

# Prédiction de la rupture adhésive des assemblages collés métalliques

**Présenté par : Thiago Birro<sup>1,2</sup>**

**Encadrement :** Frédéric LACHAUD<sup>1</sup>, Maëlen AUFRAY<sup>2</sup>, Éric PAROISSIEN<sup>1</sup>

**08 juillet 2021, Toulouse**

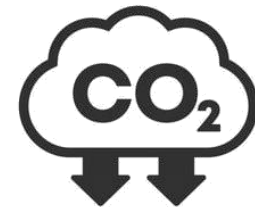
<sup>1</sup>Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, IMT MINES ALBI, UTIII, INSA, CNRS, 3 Rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France.

<sup>2</sup>CIRIMAT, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 4, allée Émile Monso -BP 44362, 31030 Toulouse Cedex 4, France.

# Application du collage

## ✓ Augmentation du rapport tenue/ masse

- Tenue statique, fatigue ...
- Volume de matière réduit



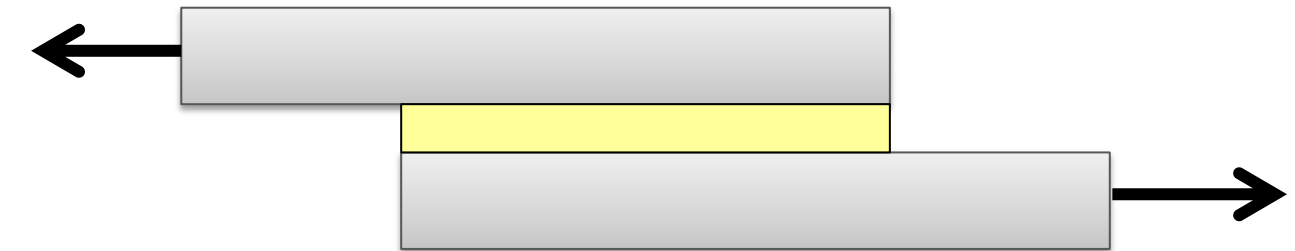
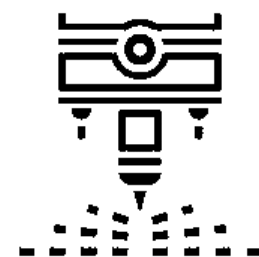
## ➔ Réduction des émissions

## ✓ Fonctionnalisation

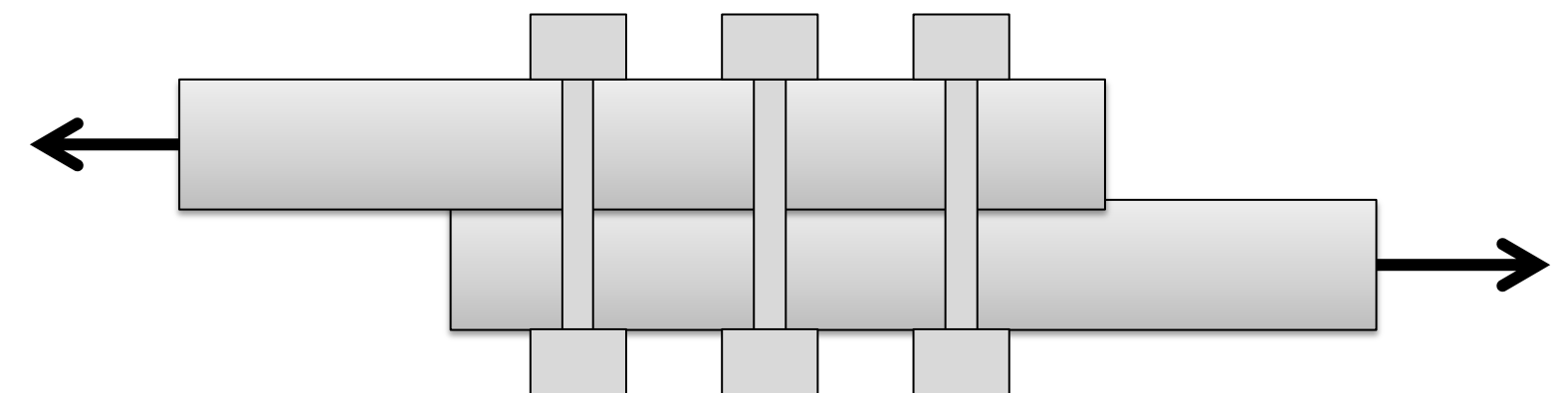
- Résistance à la corrosion
- Étanchéité

## ✓ Réduction d'usinage

- Pas de trou
- Pas de copeaux (propreté de la surf.)



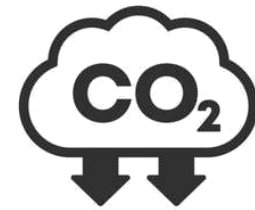
X



# Application du collage

## ✓ Augmentation du rapport tenue/ masse

- Tenue statique, fatigue ...
- Volume de matière réduit



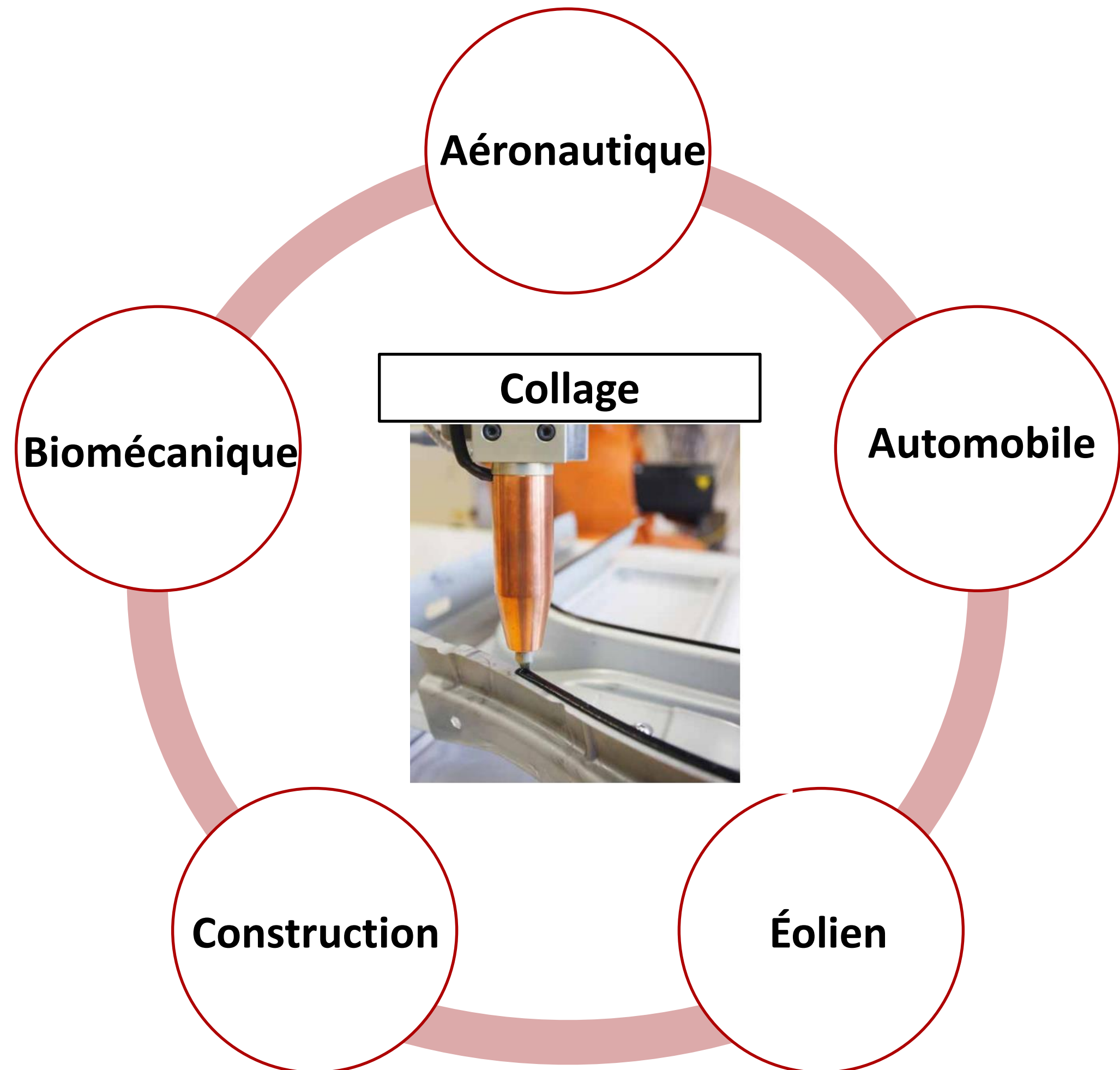
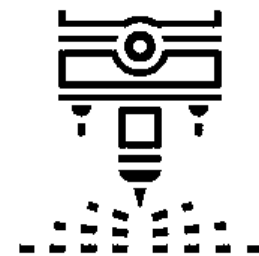
## ➔ Réduction des émissions

## ✓ Fonctionnalisation

- Résistance à la corrosion
- Étanchéité

## ✓ Réduction d'usinage

- Pas de trou
- Pas de copeaux (propreté de la surf.)

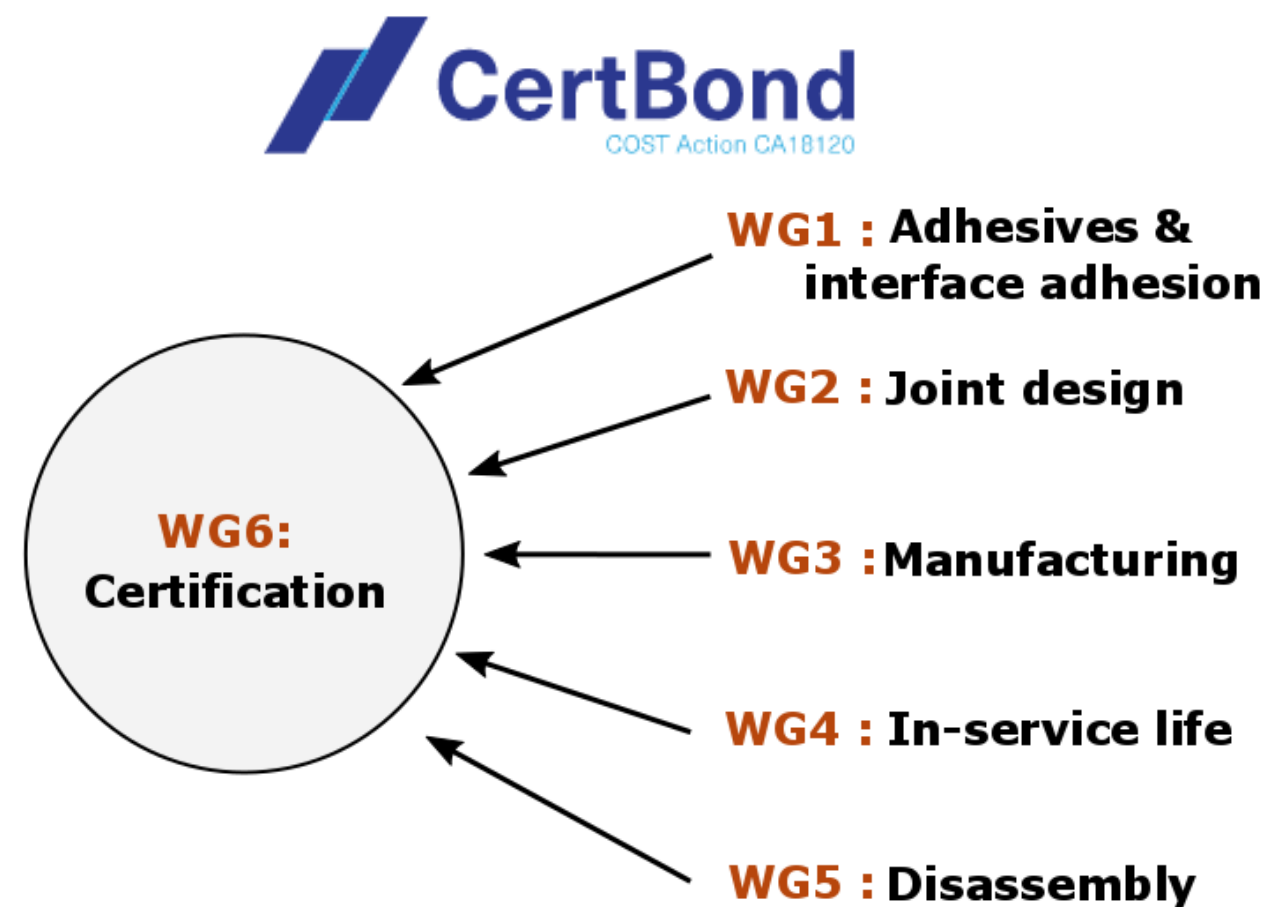


# Verrous

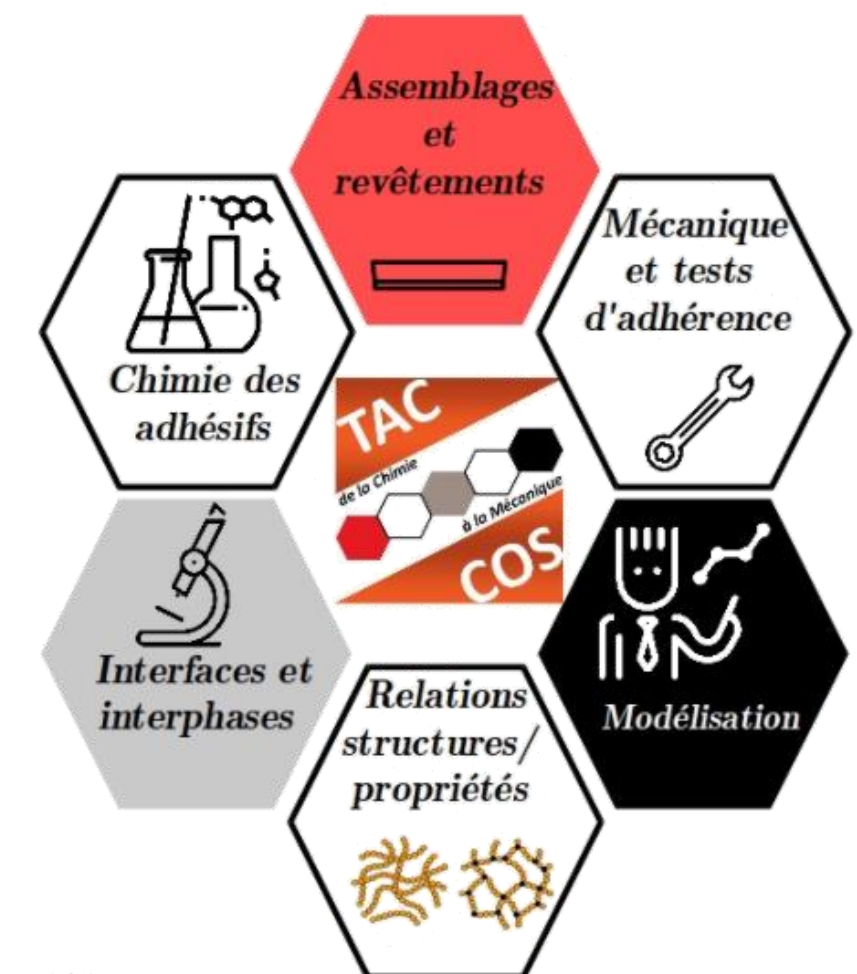
Comment assurer : (1) le dimensionnement et (2) la qualité d'un joint collé ?



Niveau Européen - 2019



Niveau local - 2017



# Sommaire

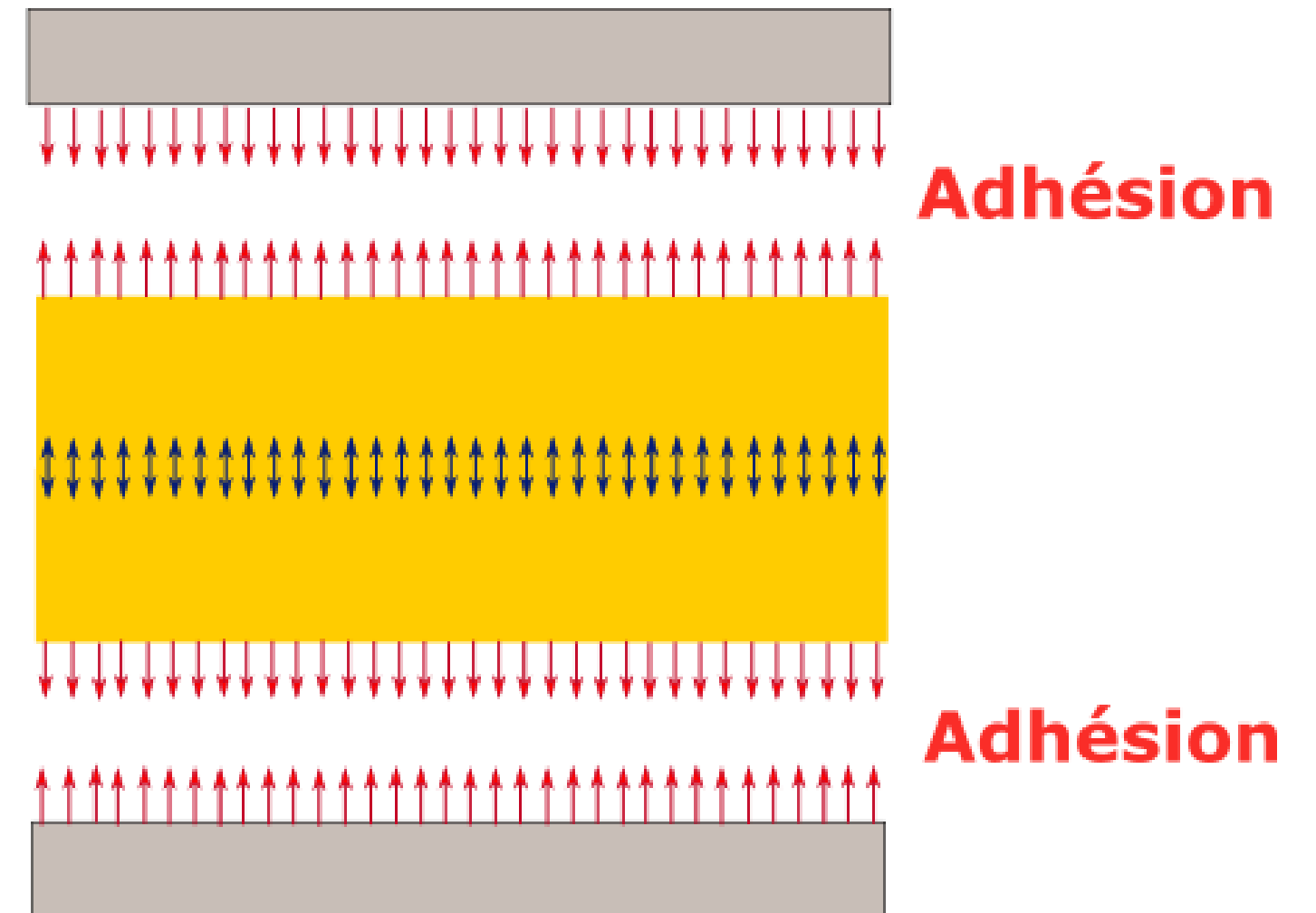
- **Introduction**
  - Définitions
  - Résultats préliminaires
- **Caractérisation expérimentale**
- **Approche numérique**
- **Conclusion et perspectives**

# Définitions des mots-clés

- **Adhésion**

- Phénomènes physico-chimiques lorsque deux matériaux sont maintenus en contact intime (échelle microscopique et macroscopique)

**Cohésion**

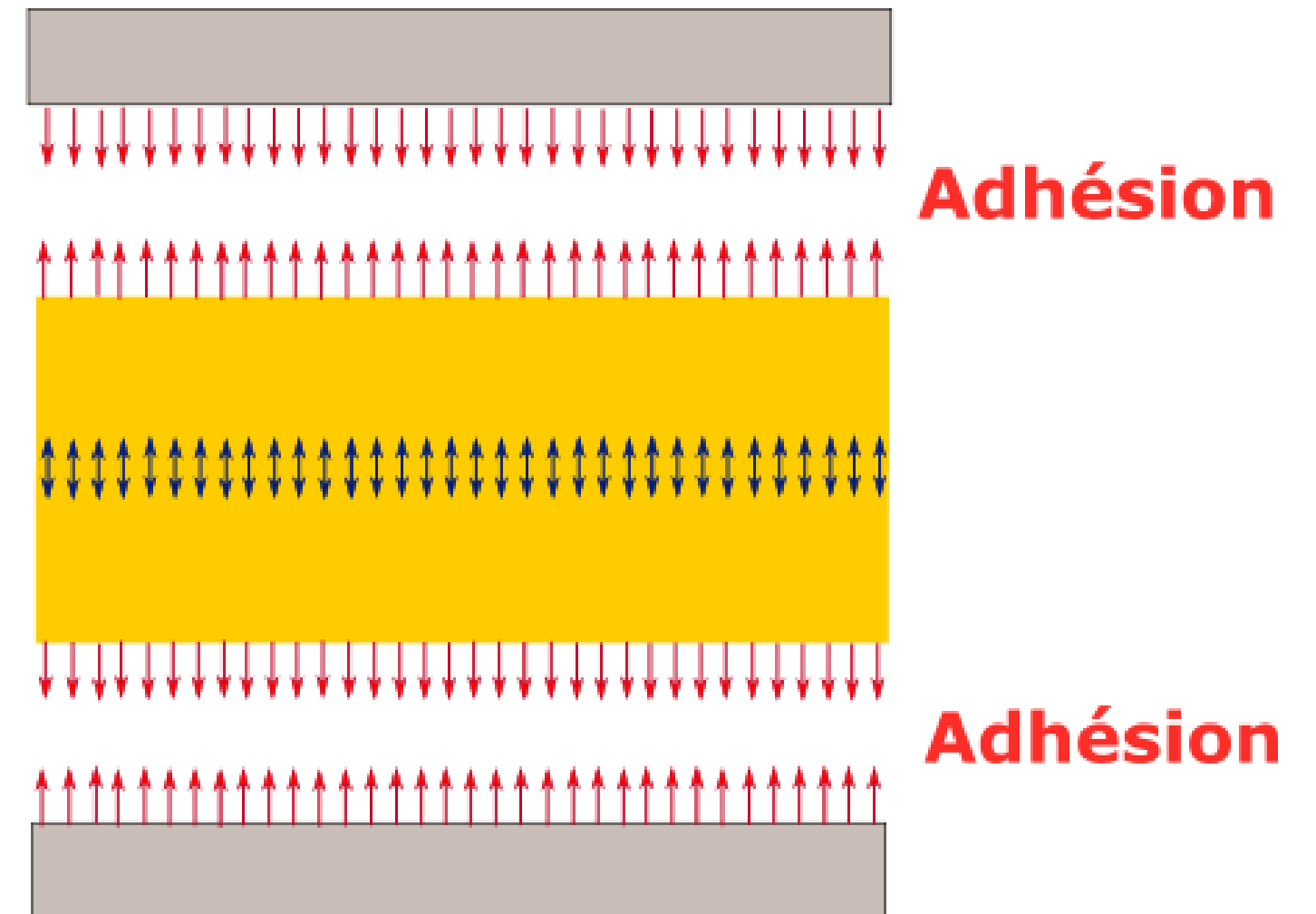


# Définitions des mots-clés

- **Cohésion**

- Molécules similaires qui s'attachent entre elles et qui s'attirent mutuellement

**Cohésion**

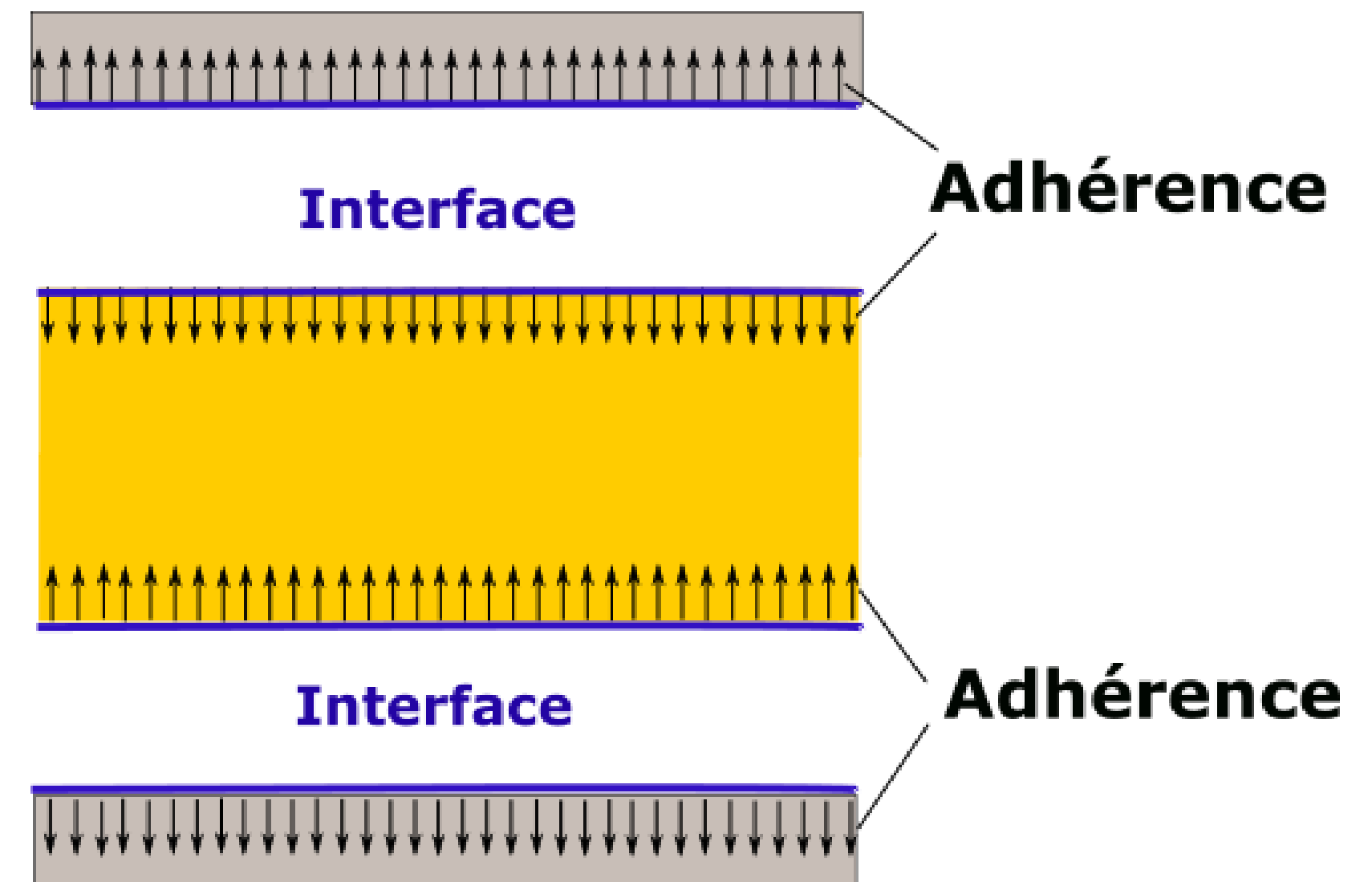




# Définitions des mots-clés

- **Adhérence**

- Force, contrainte, énergie nécessaire pour séparer deux matériaux réunis par une surface commune (échelle microscopique et macroscopique)



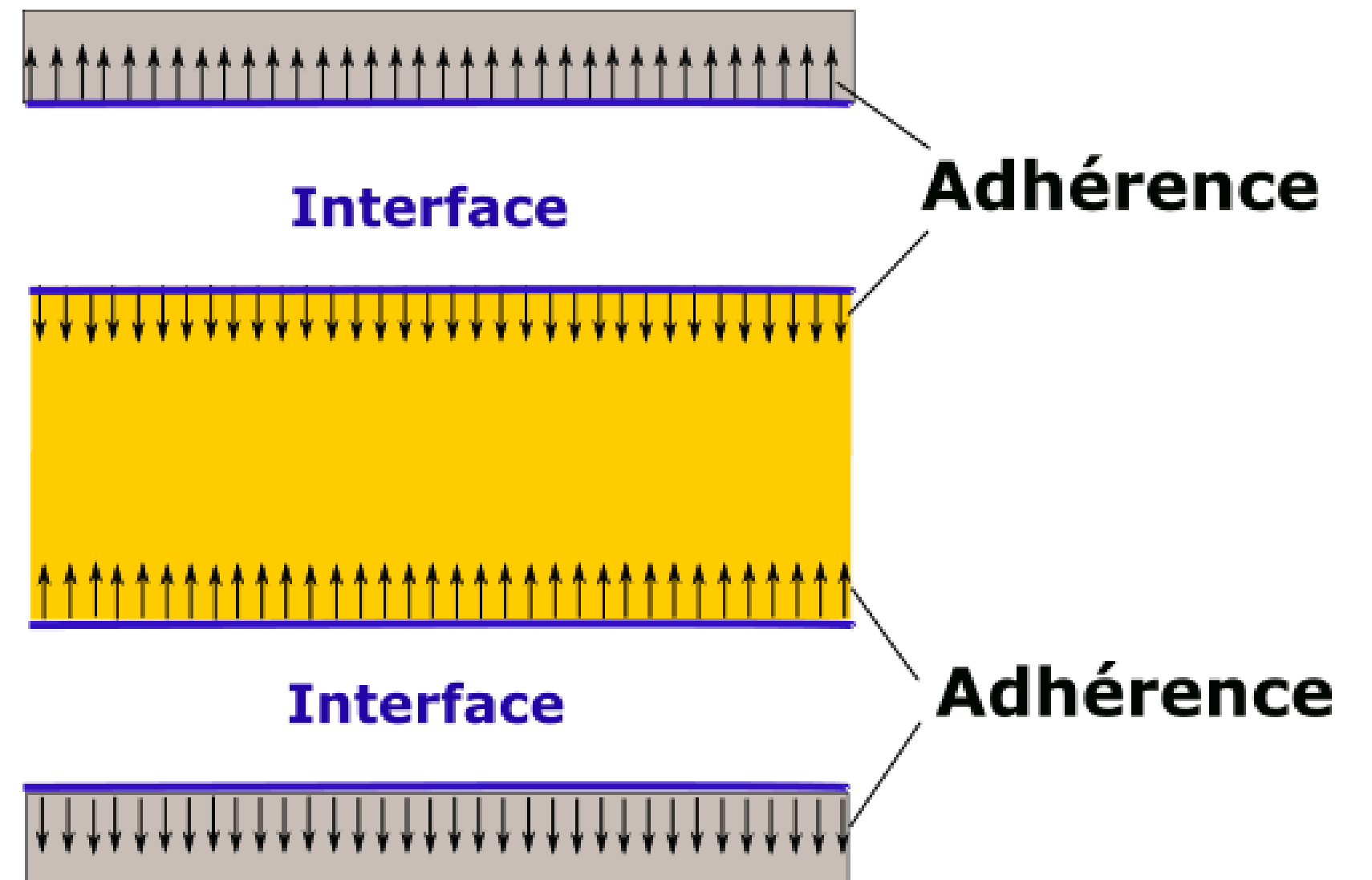
Cognard (2005), Good (1974), ASTM D907-15



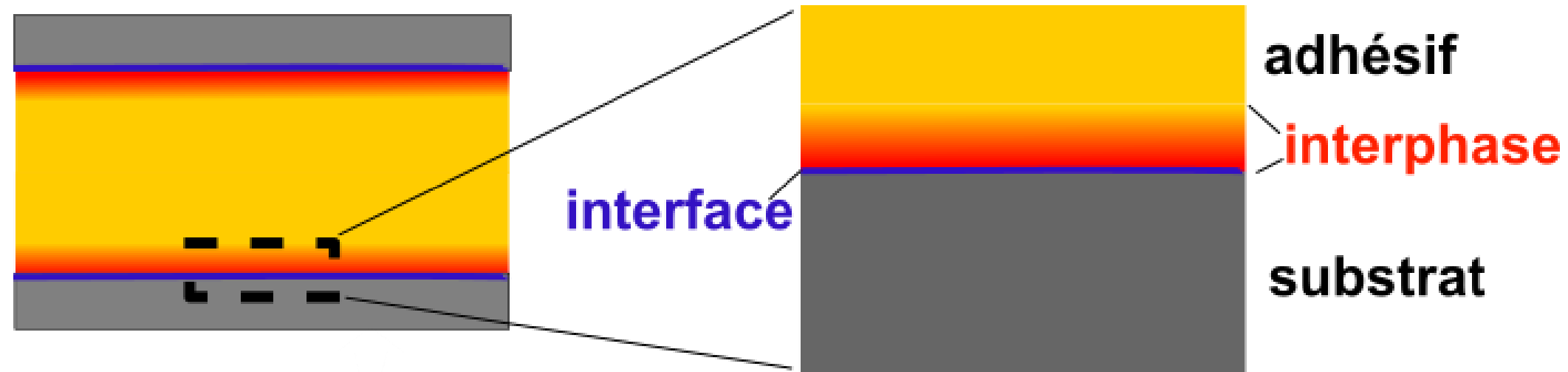
# Définitions des mots-clés

- **Interface**

- La surface idéale qui sépare les deux matériaux en contact



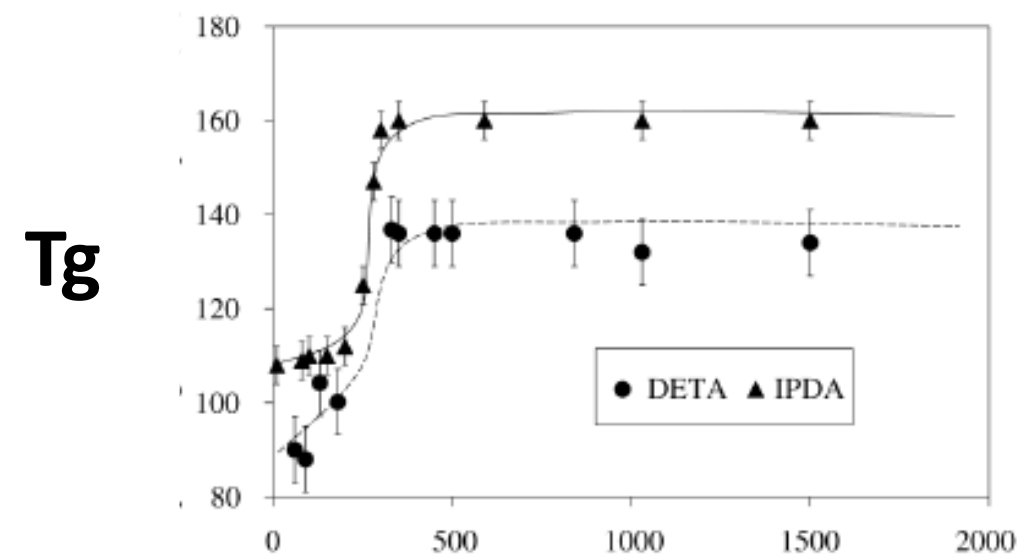
## Et l'interphase (?)



Rupture à l'interface → cas idéal

**Dans l'interphase :**  
les propriétés chimiques,  
physiques, mécaniques sont  
différentes du polymère en  
volume et du substrat

DGEBA (IPDA et DETA) sur alliage d'aluminium



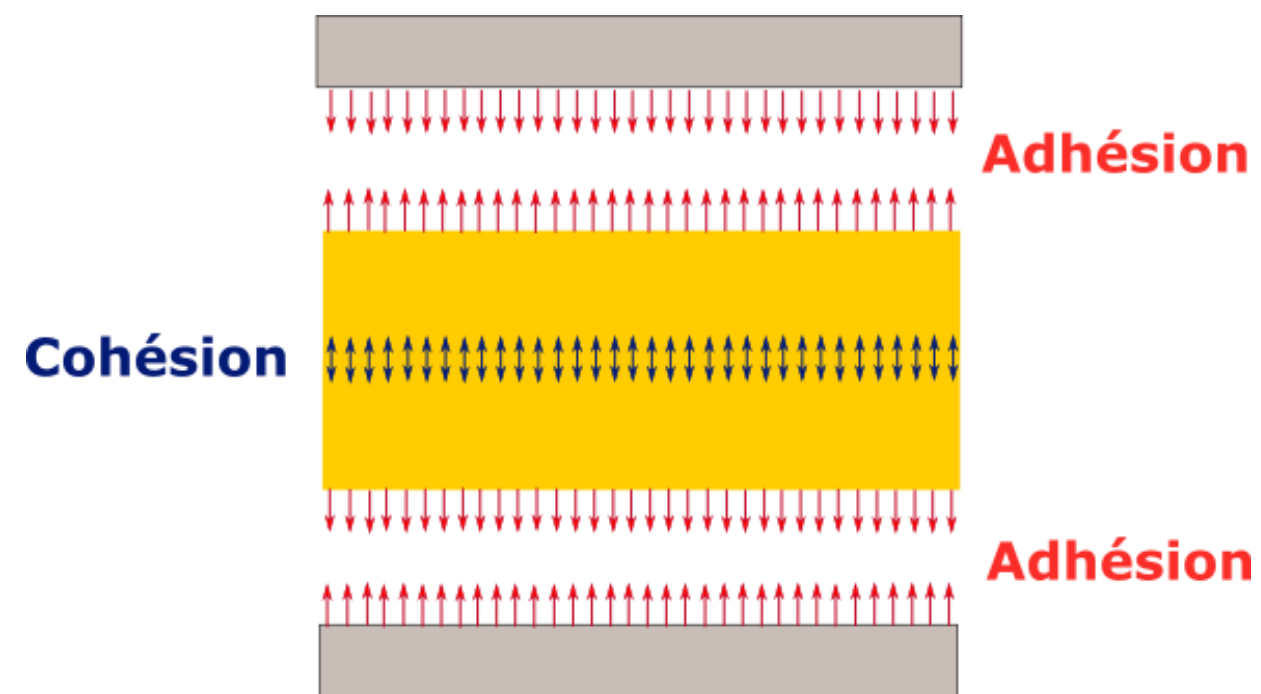
Épaisseur du revêtement

**Systèmes étudiés**

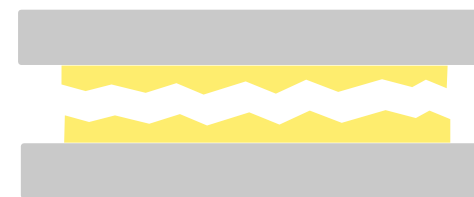
Épaisseur jusqu'à 300 μm  
(**Aufray et al, 2005**)

# Pratique courante

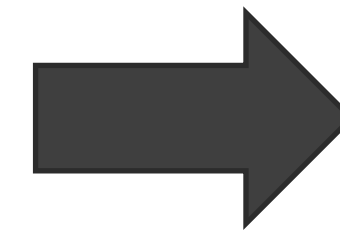
Rupture cohésive ou adhésive?



**cohésive**



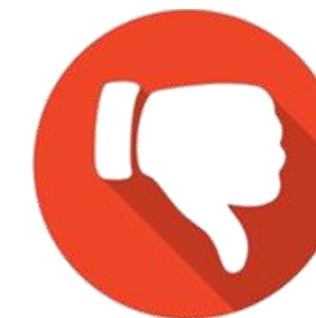
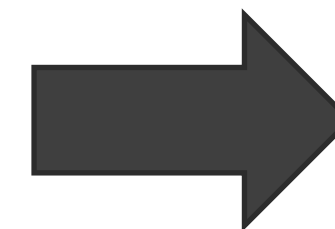
**Collage accepté traditionnellement**



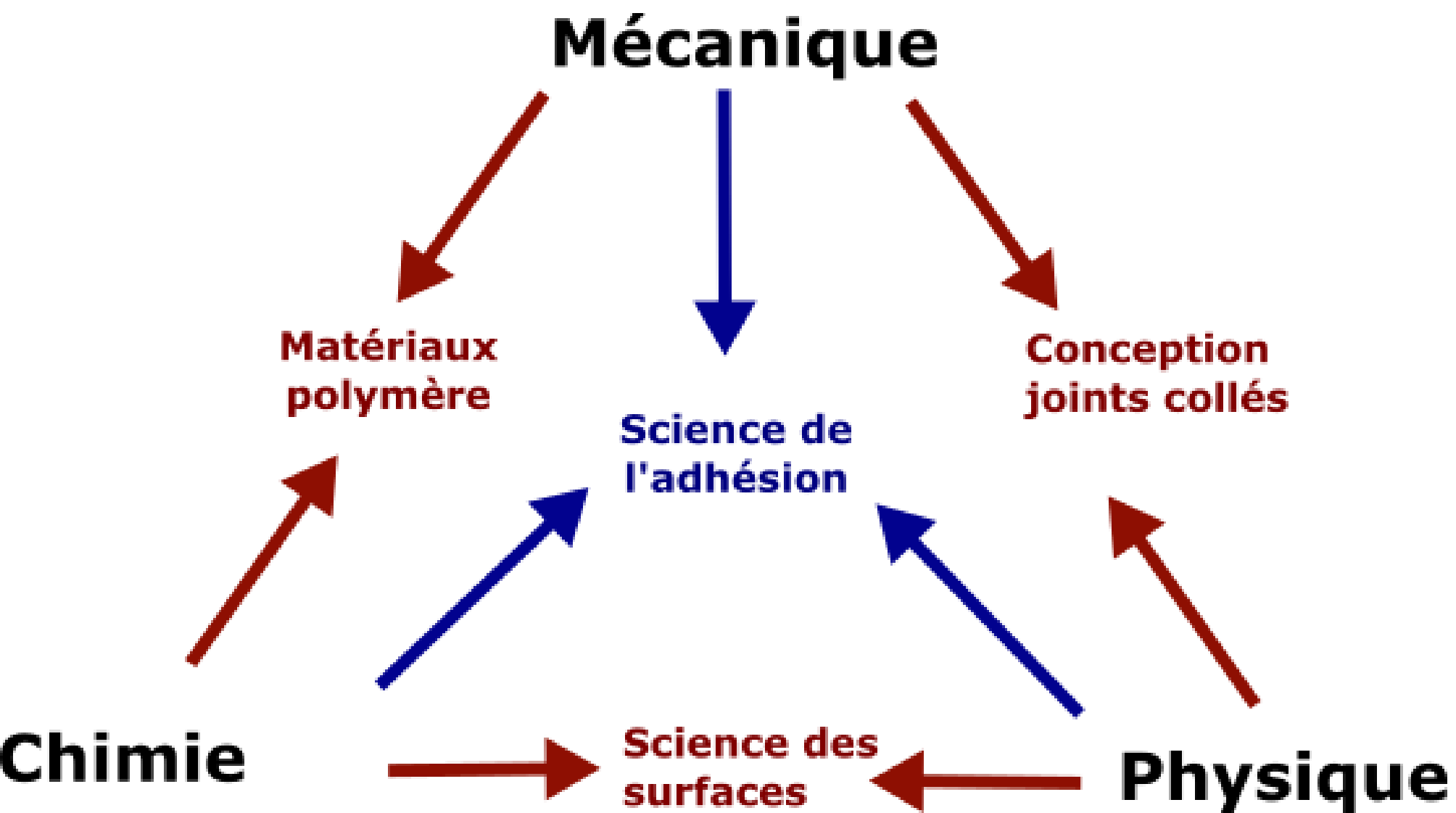
**adhésive**



**Collage refusé traditionnellement**

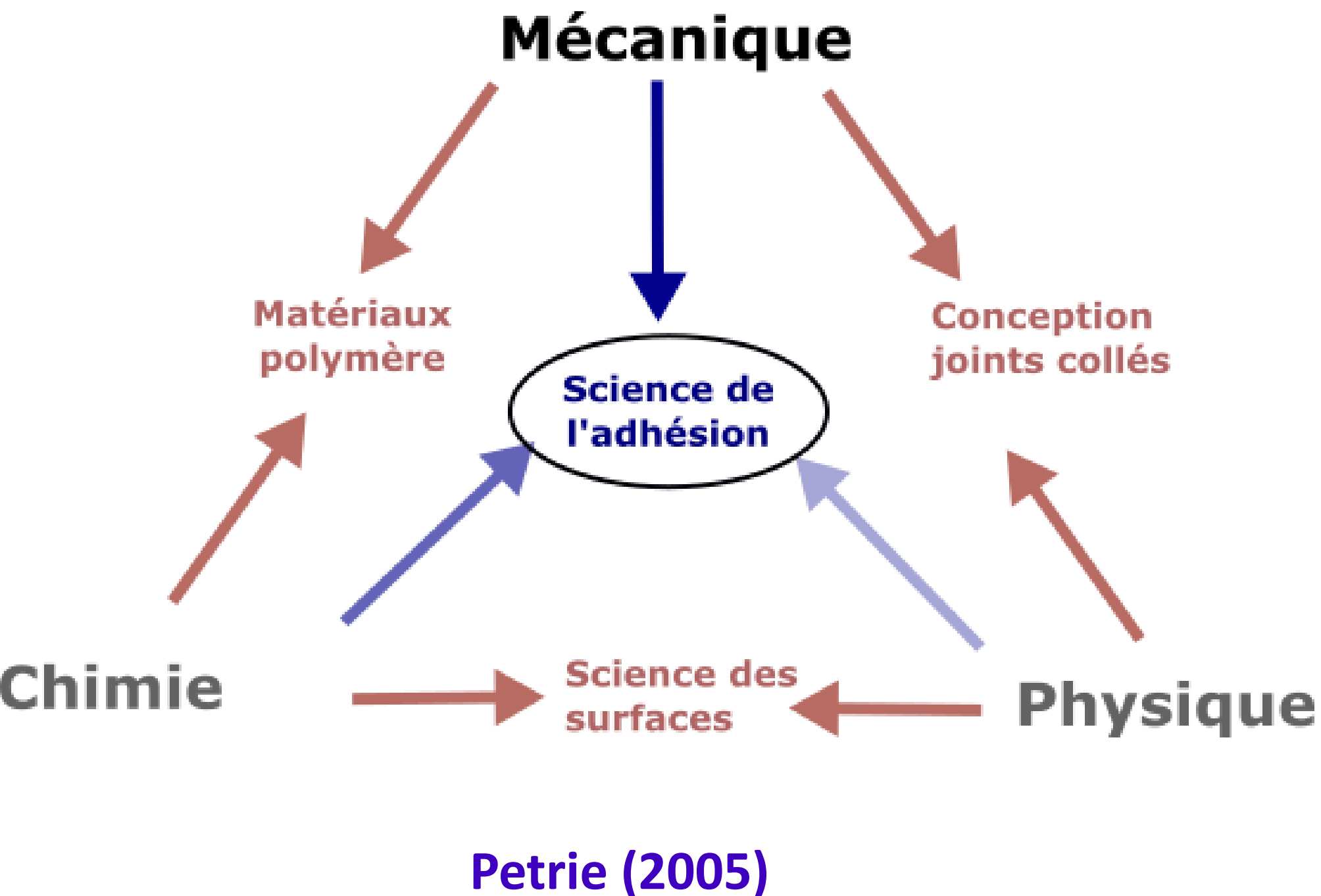


# Une approche multidisciplinaire



Petrie (2005)

# Une approche multidisciplinaire



Comment mesurer l'adhérence pour dimensionner un joint collé, en tirant le bénéfice de la **multidisciplinarité** ?



# Caractérisation de l'adhérence

Test

Essai de pelage  
(flexible – rigide)  
ISO 8510 – 2

Pull-off modifié

Arcan modifié

Flexion 3 points

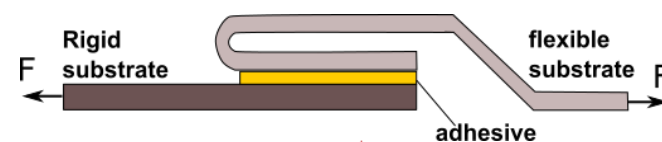
Flexion 4 points

Nombre d'interfaces

Localisation  
de l'amorçage

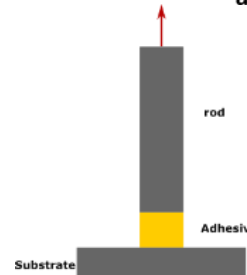
2

Non



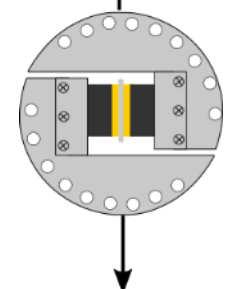
2

Non



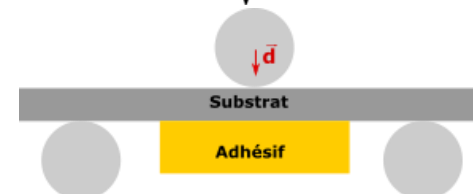
4

Non



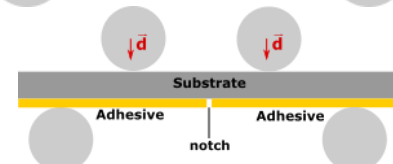
1

Oui



1

Non



# Caractérisation de l'adhérence

## Test

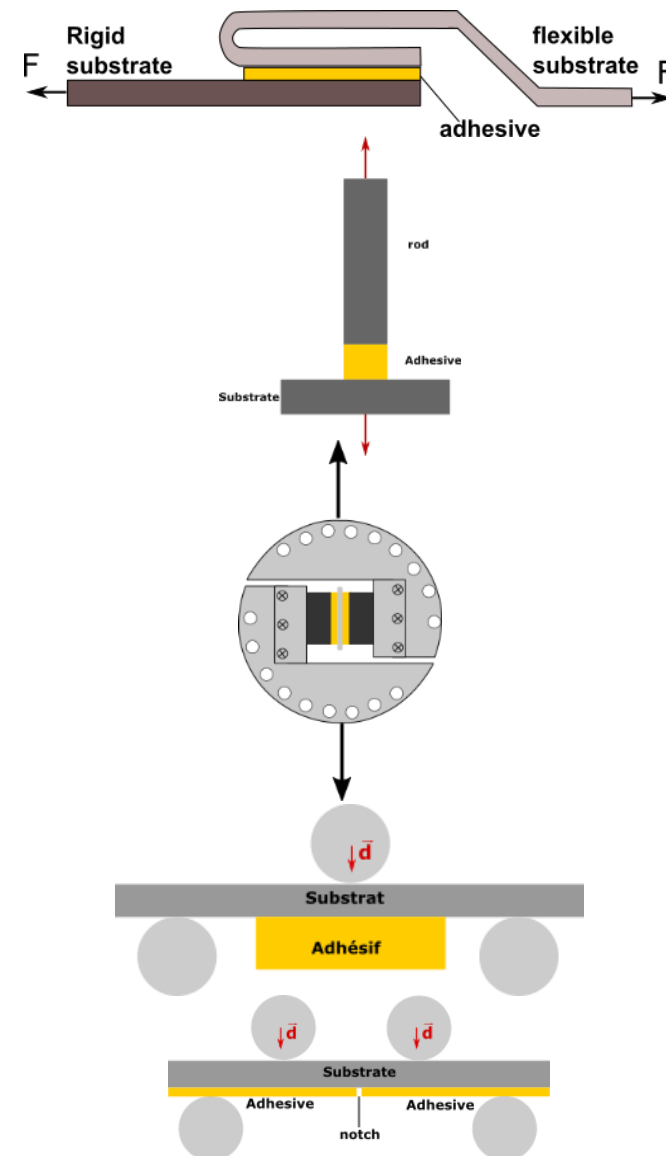
Essai de pelage  
(flexible – rigide)  
ISO 8510 – 2

Pull-off modifié

Arcan modifié

Flexion 3 points

Flexion 4 points



Nombre d'interfaces

2

2

4

1

1

Localisation  
de l'amorçage

Non

Non

Non

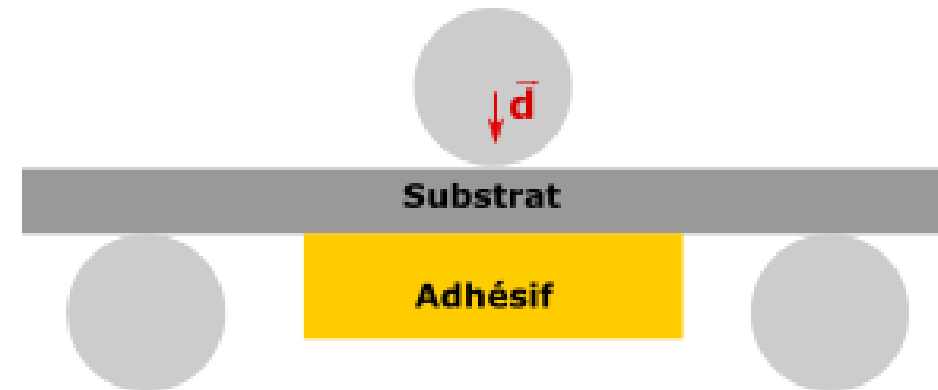
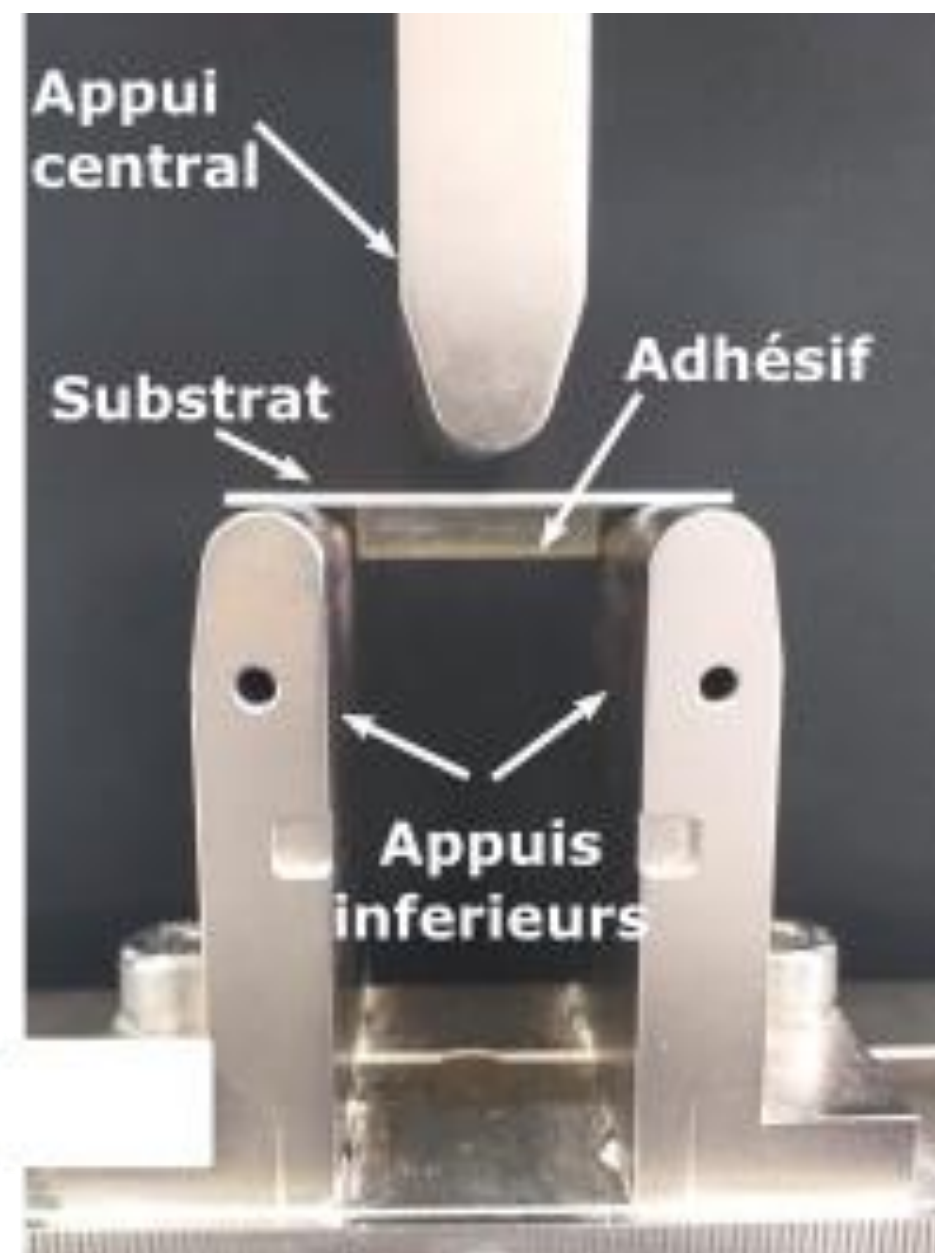
Oui

non

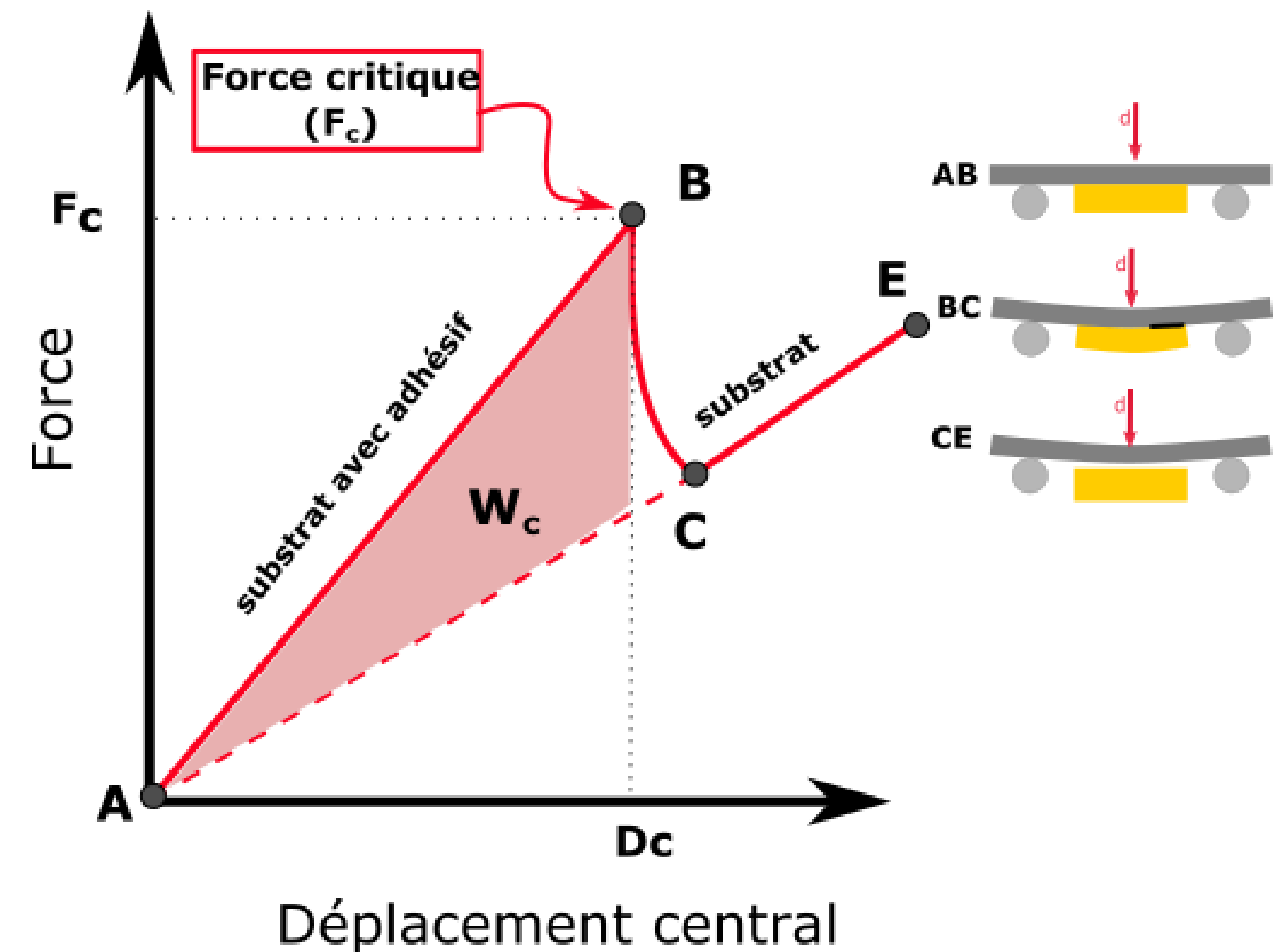


# Caractérisation de l'adhérence

ISO 14679:1997

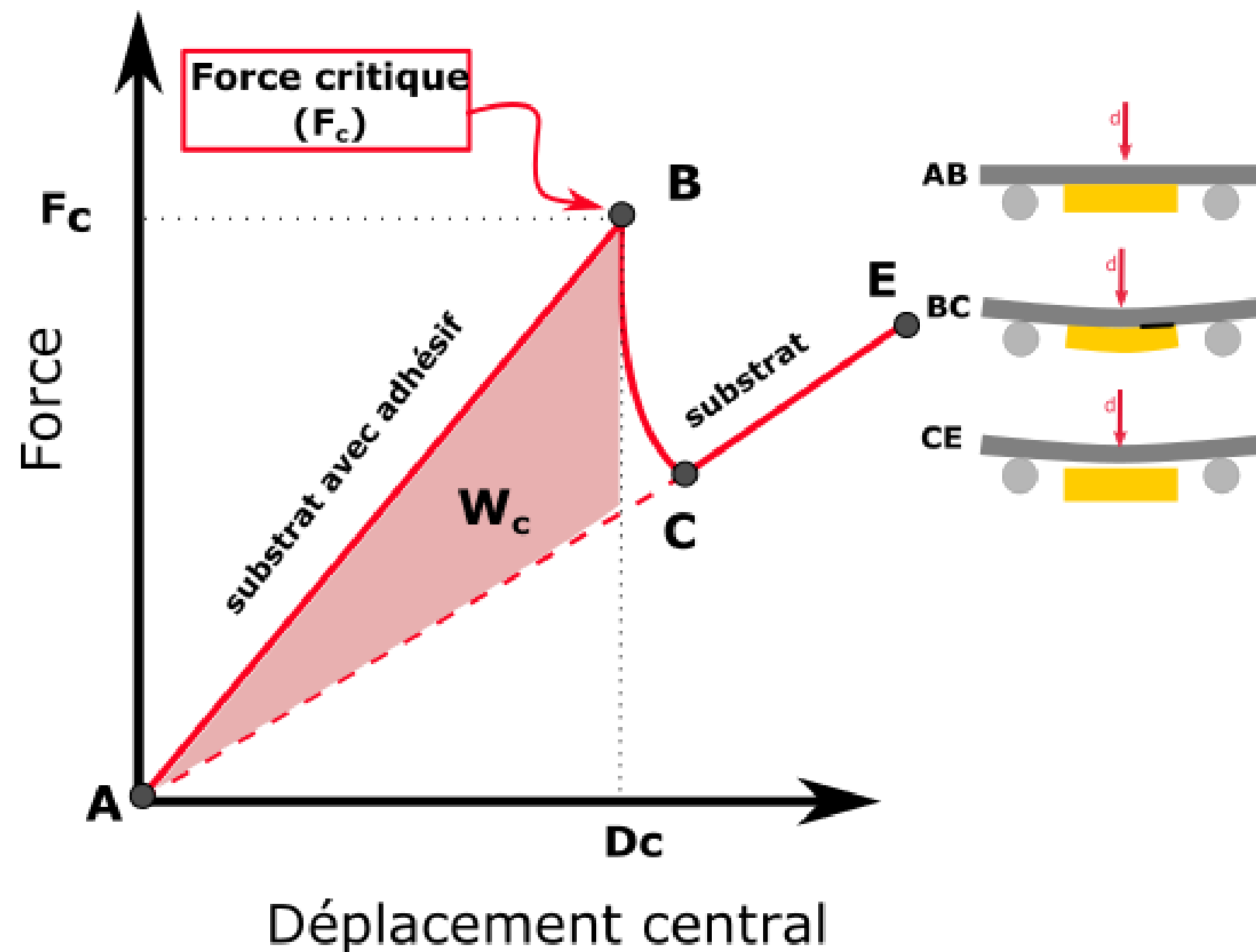


Essai flexion 3 points

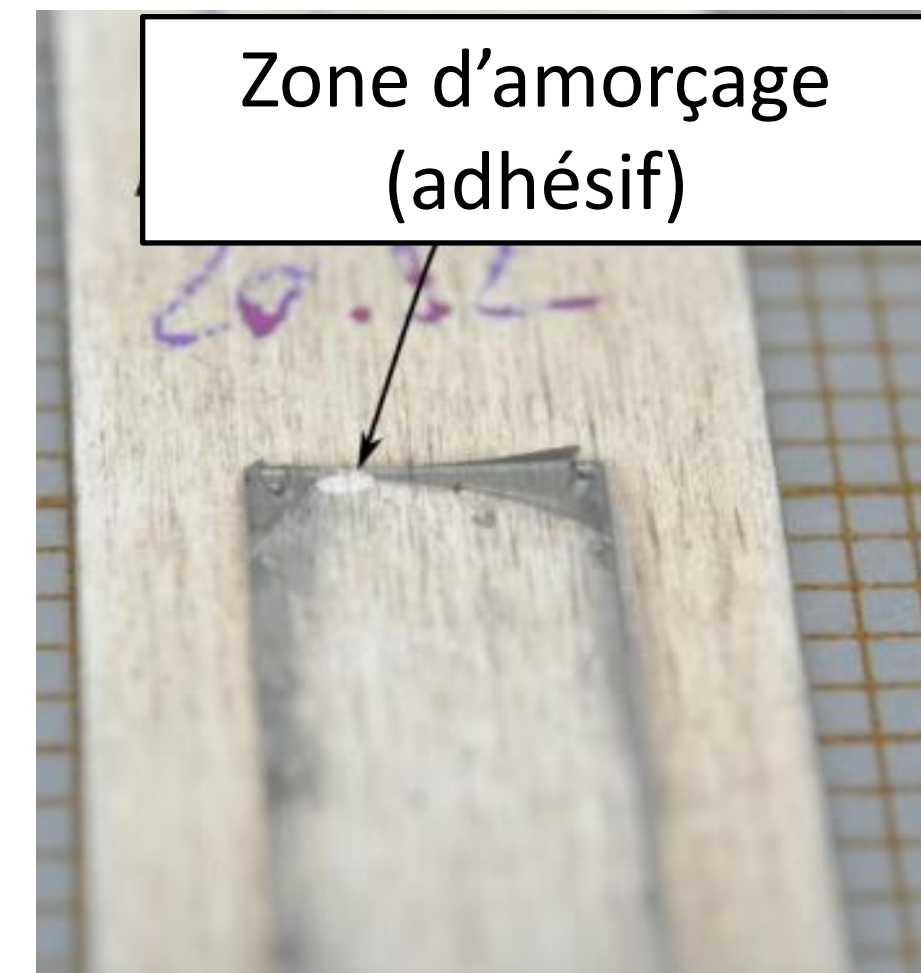


# Caractérisation de l'adhérence

## Point B : amorçage de la rupture

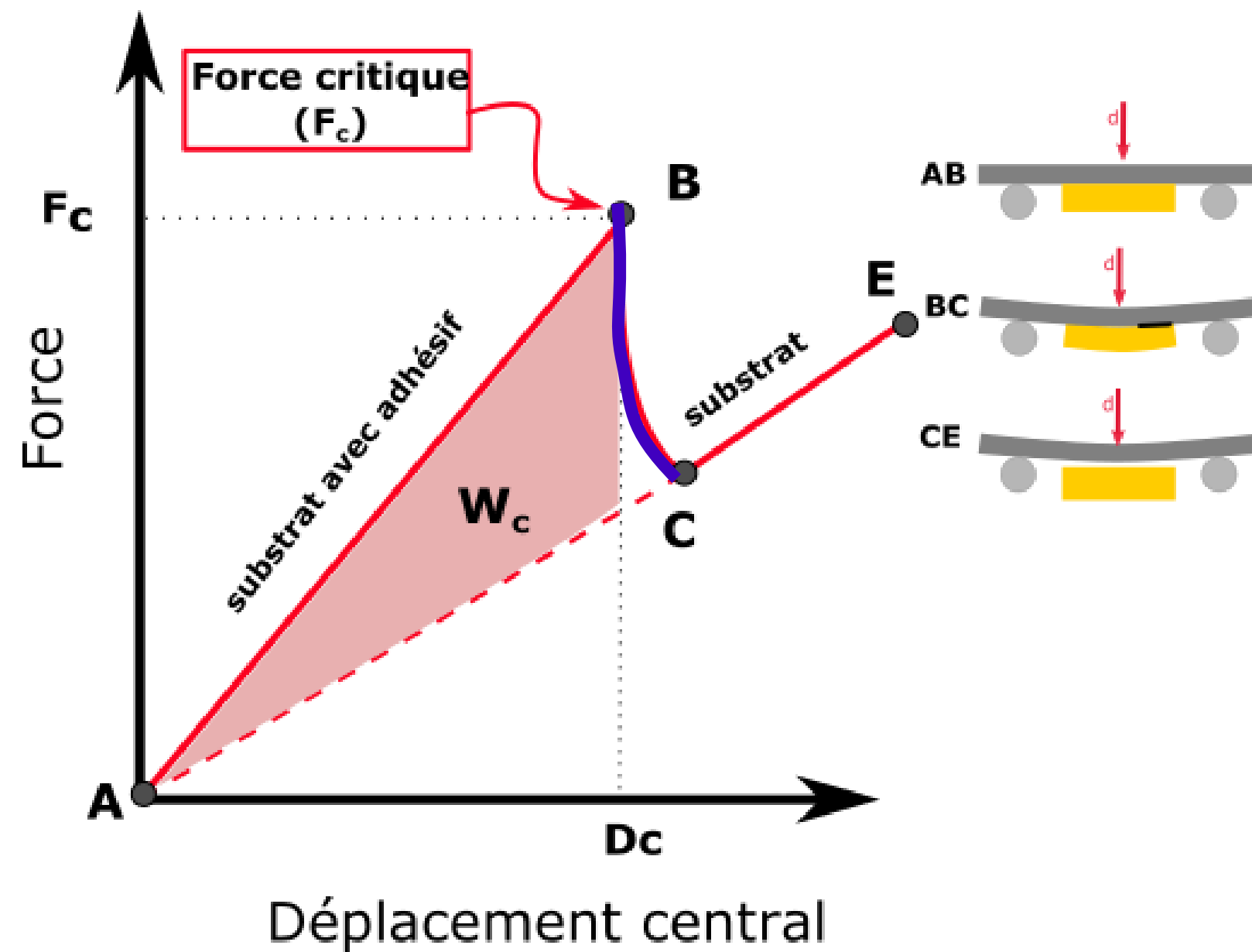


Surface elliptique appelée :  
« petit rond »

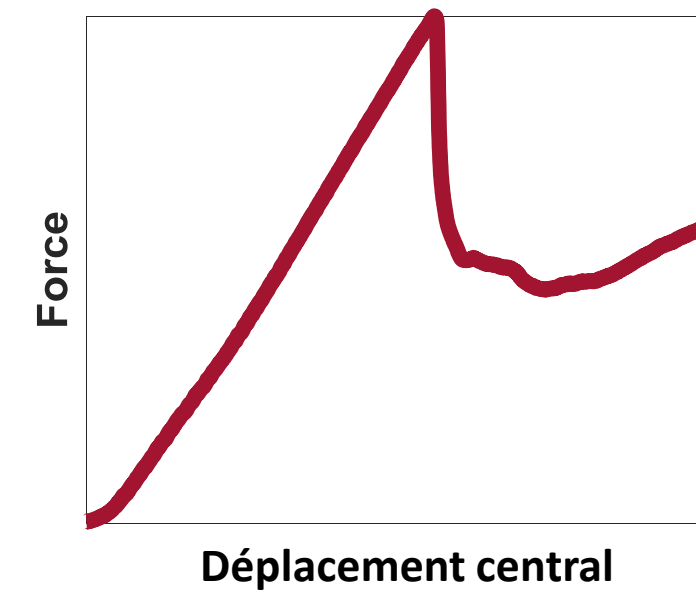


# Propagation de rupture

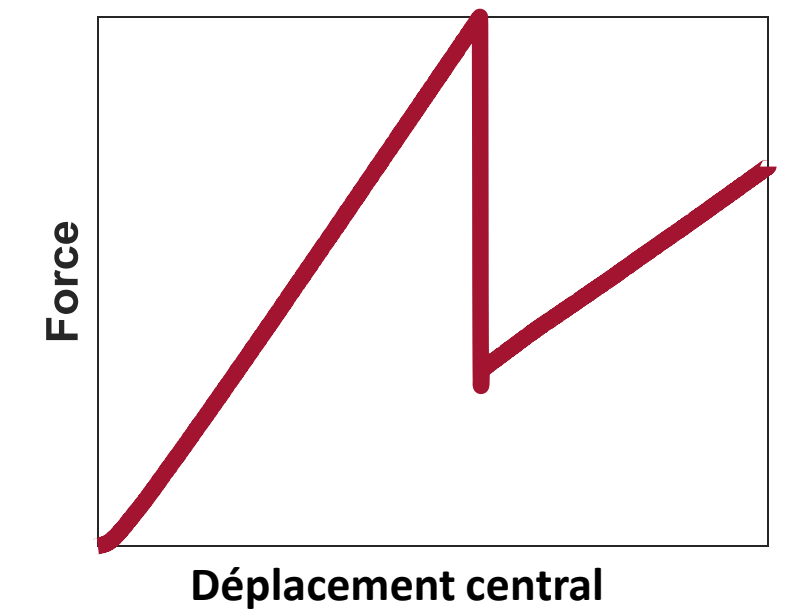
## Types de propagation (entre B et C)



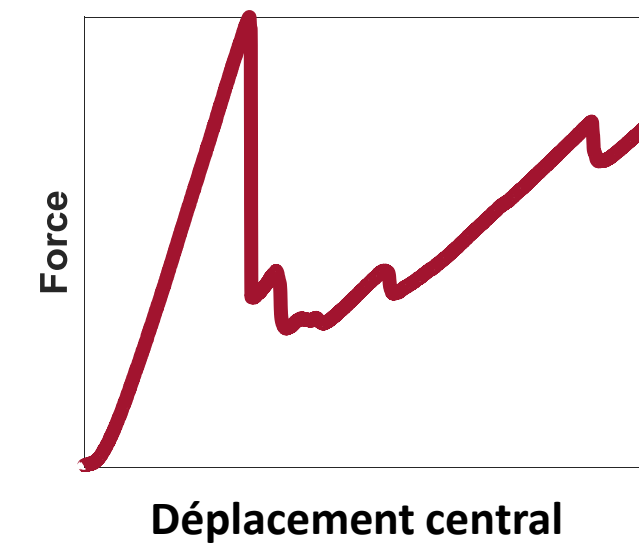
## Propagation stable



## Propagation instable

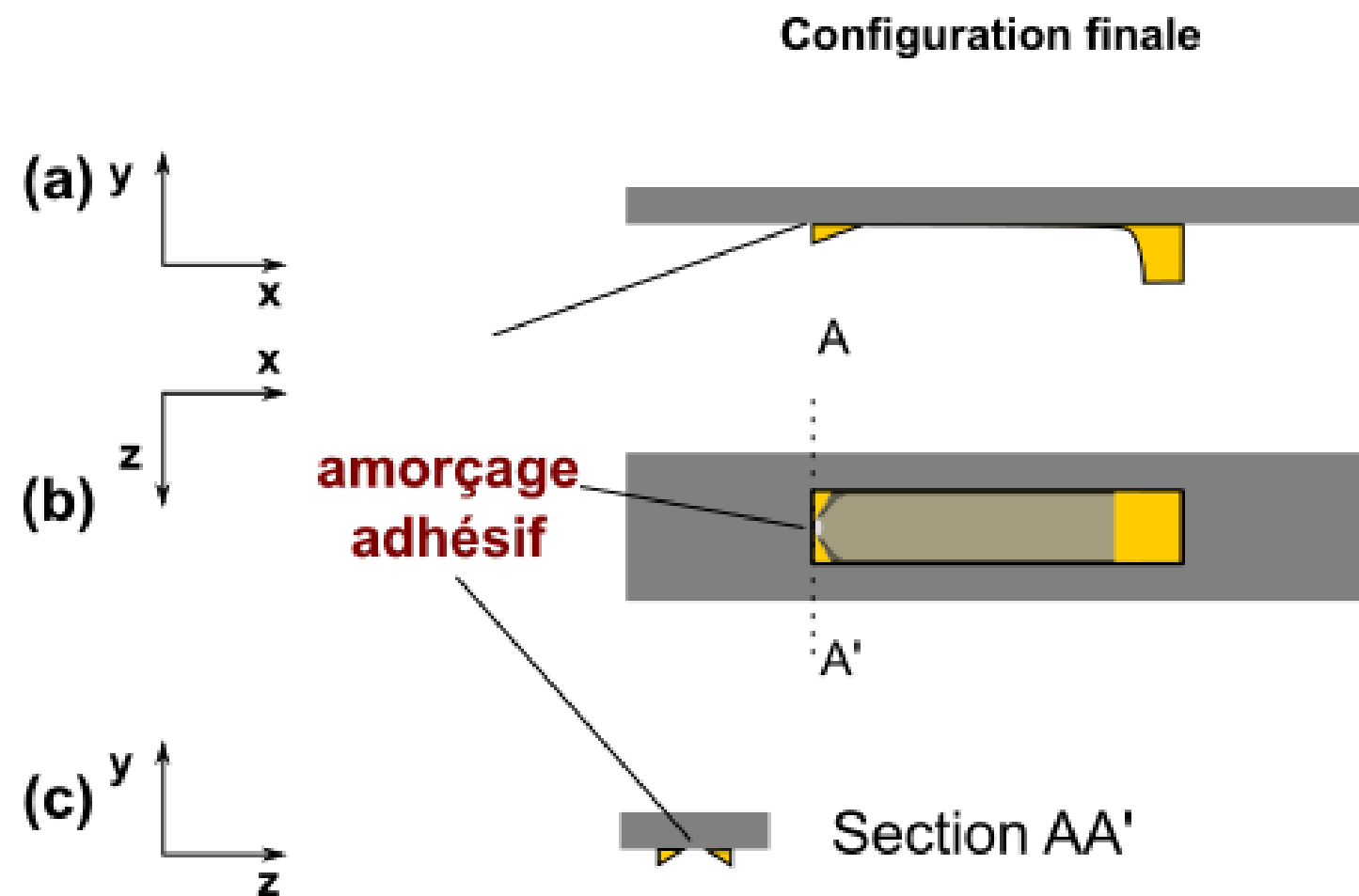


## Propagation par paliers



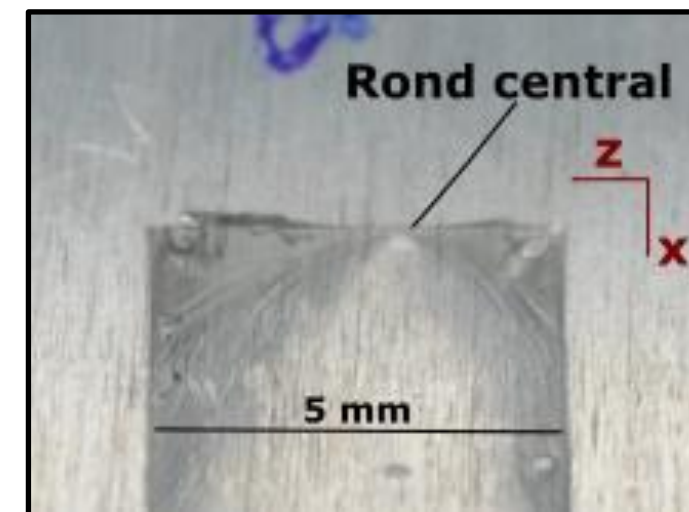
# Types d'amorçage de rupture

## Amorçage typique

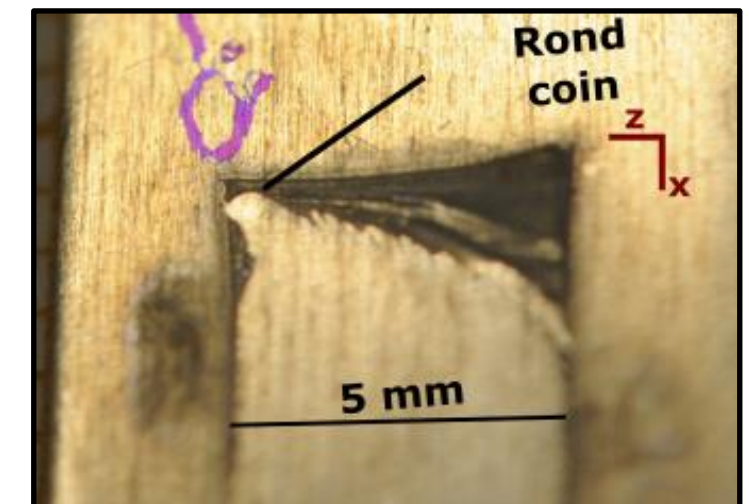


## Zone d'amorçage identifiable

central



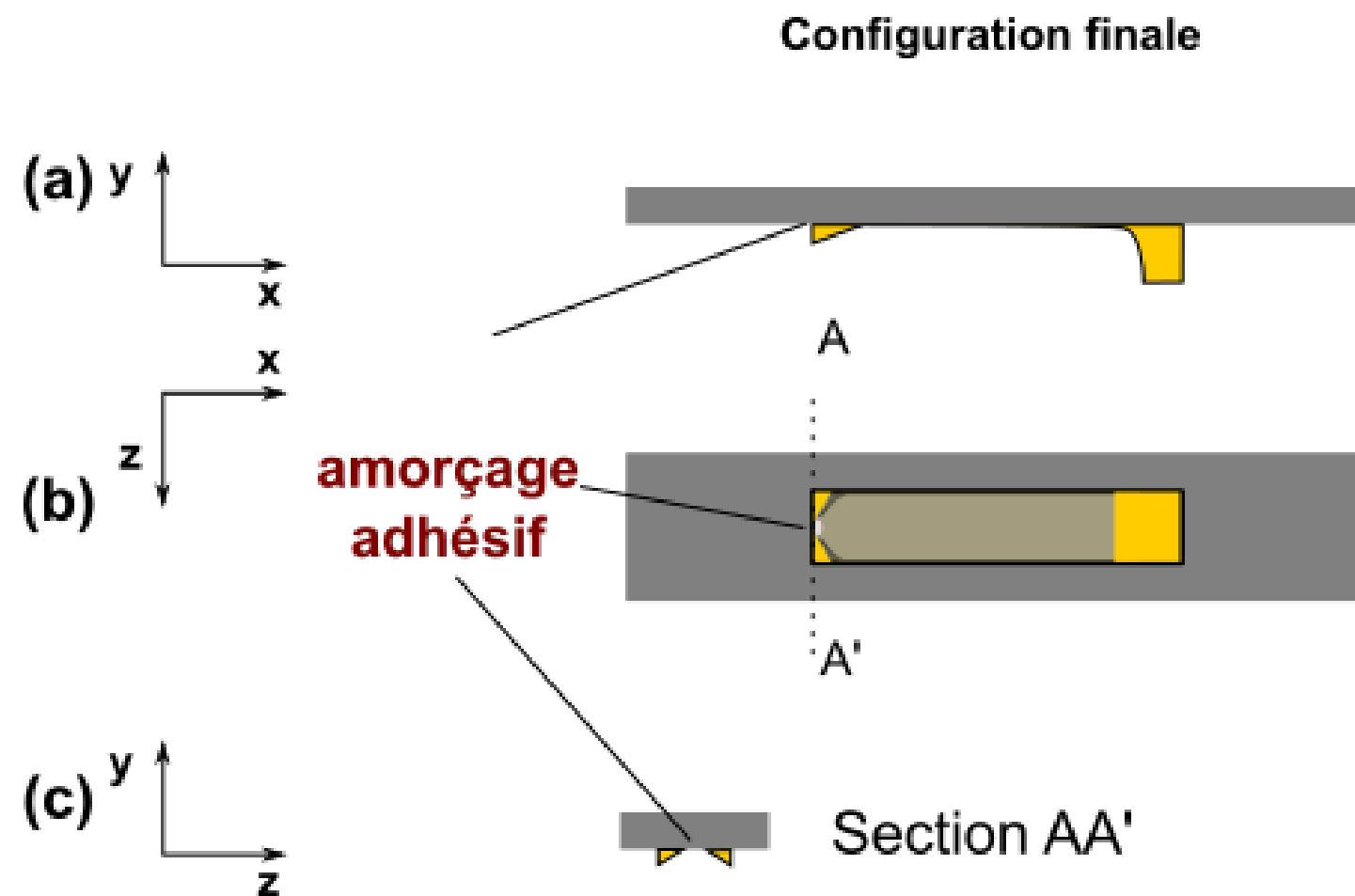
coin





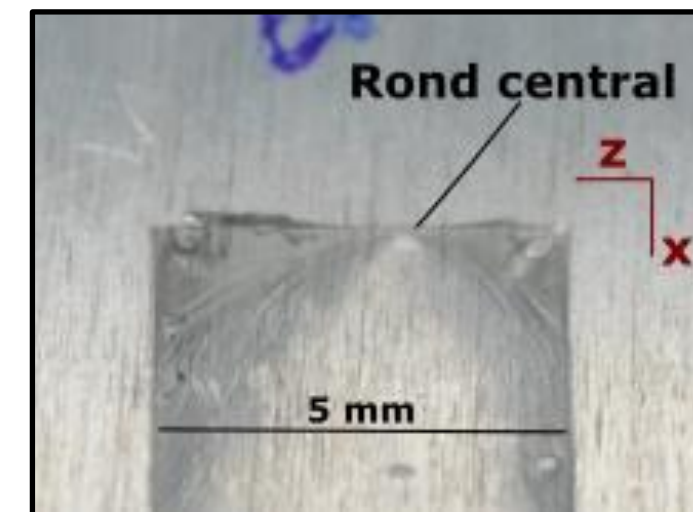
# Types d'amorçage de rupture

## Amorçage typique

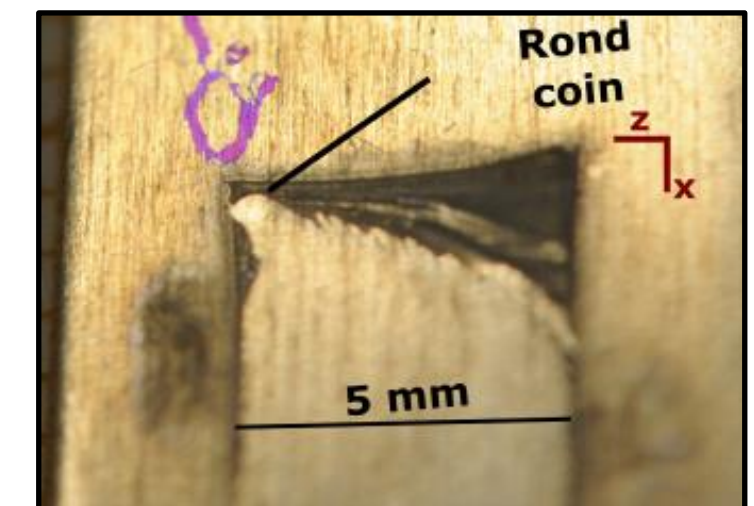


### Zone d'amorçage identifiable

central



coin

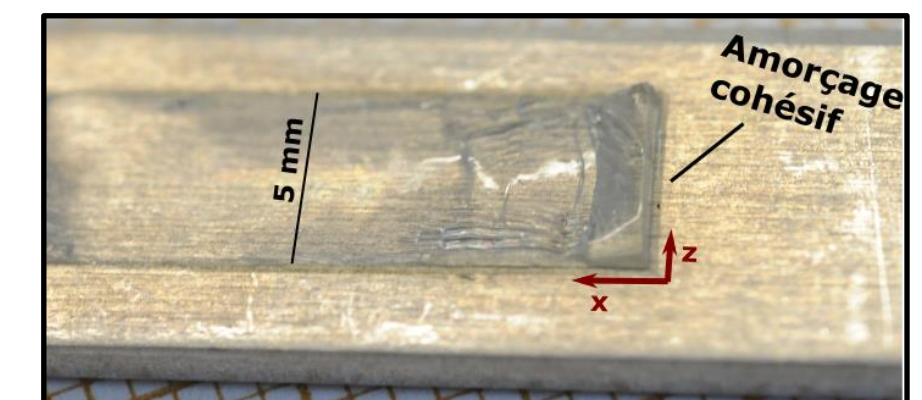


### Discernement entre amorçage et propagation impossible

adhésif



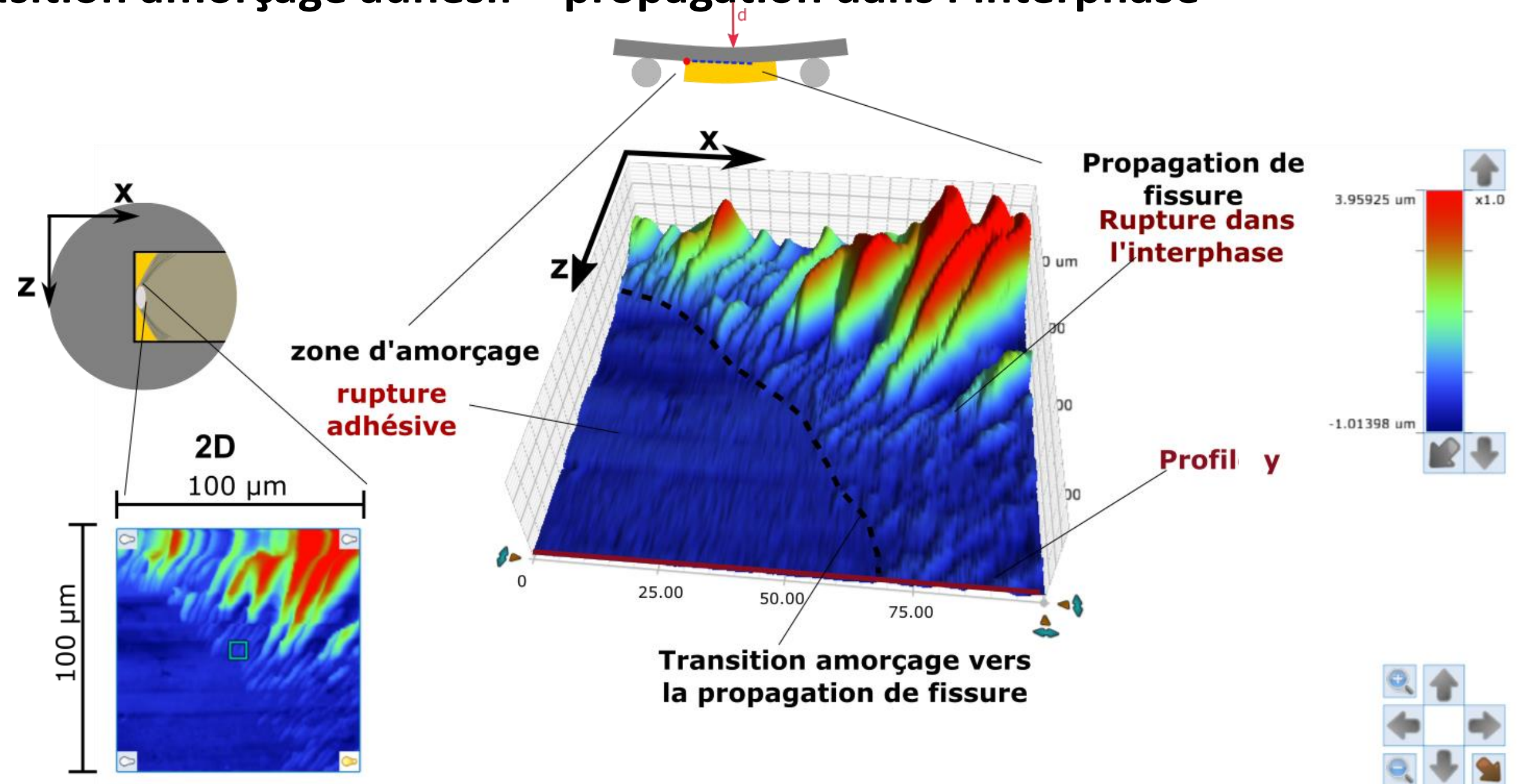
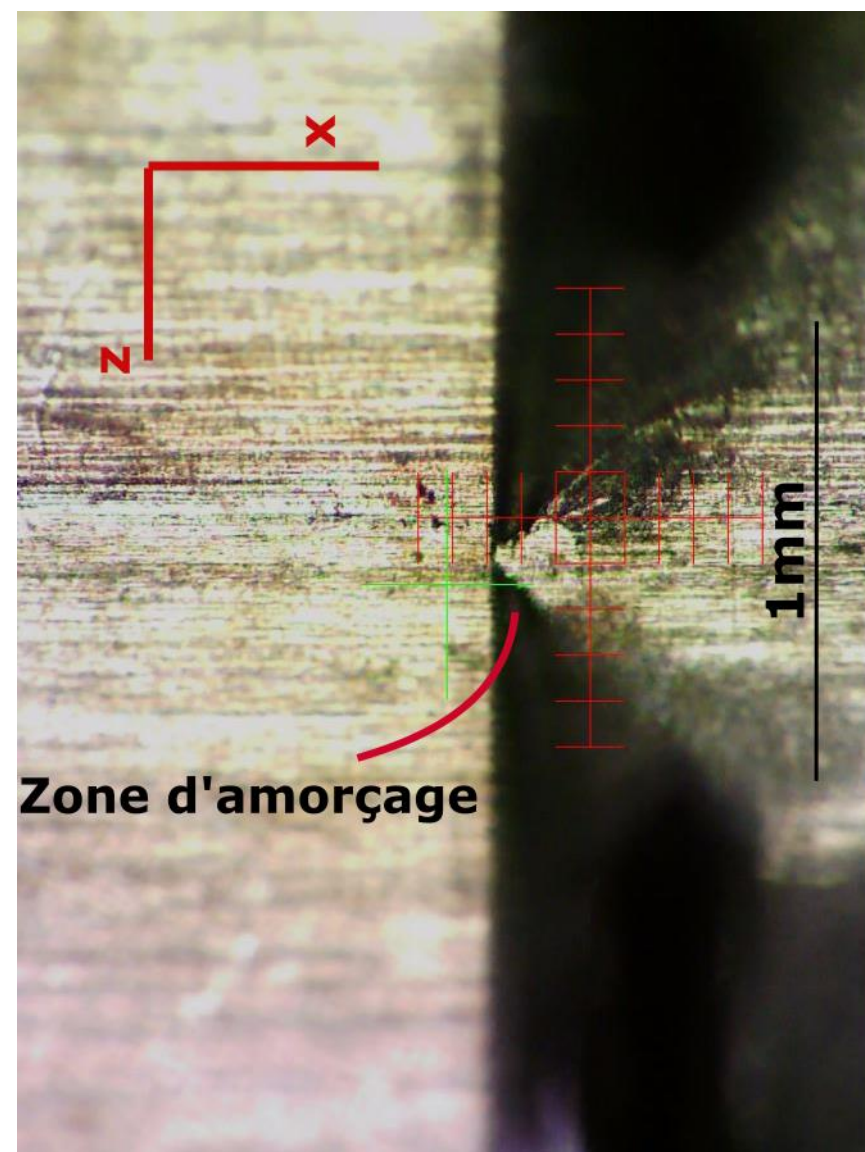
cohésif





# Rupture adhésive - analyse par profilomètre mécanique

## Transition amorçage adhésif – propagation dans l'interphase

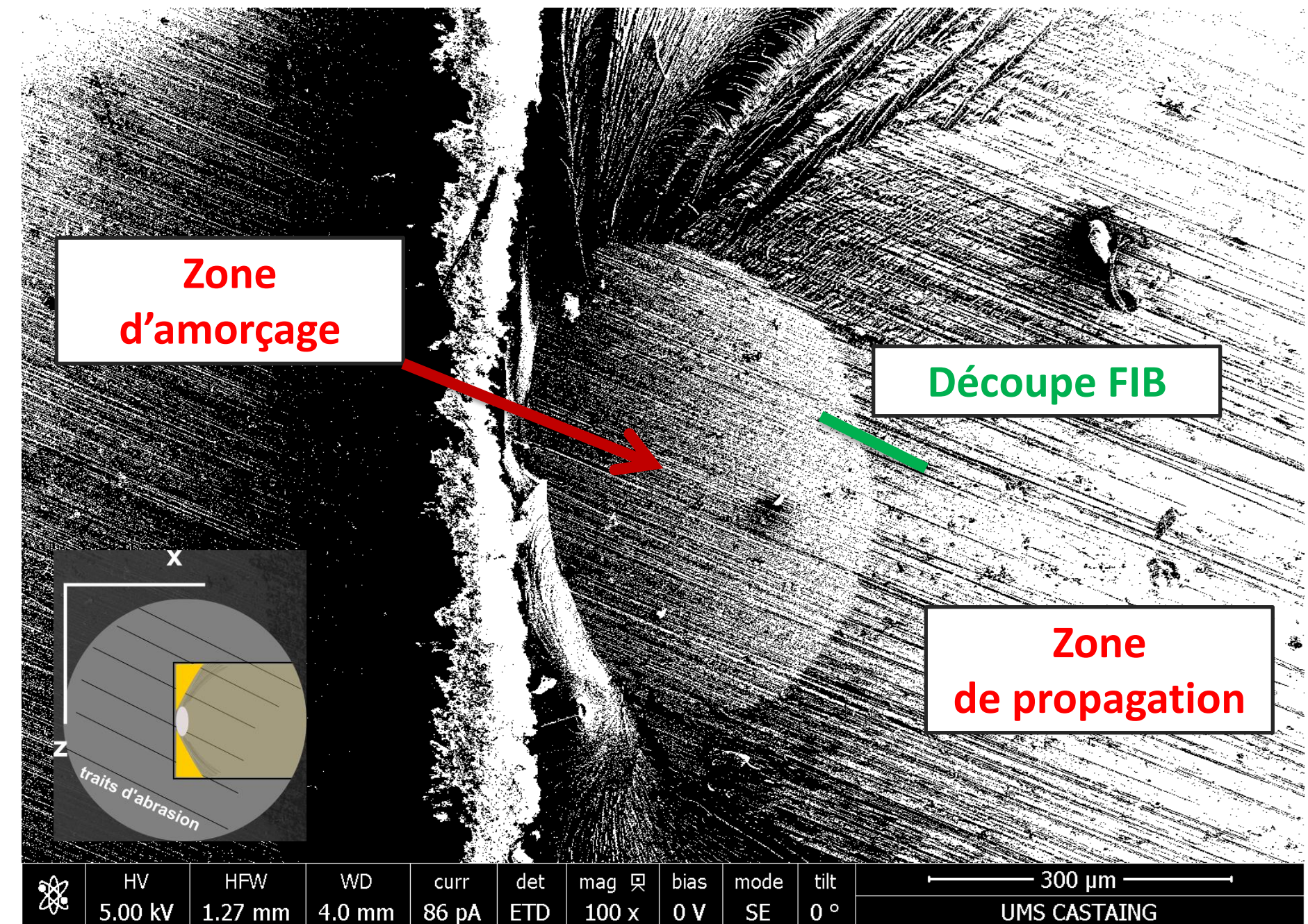
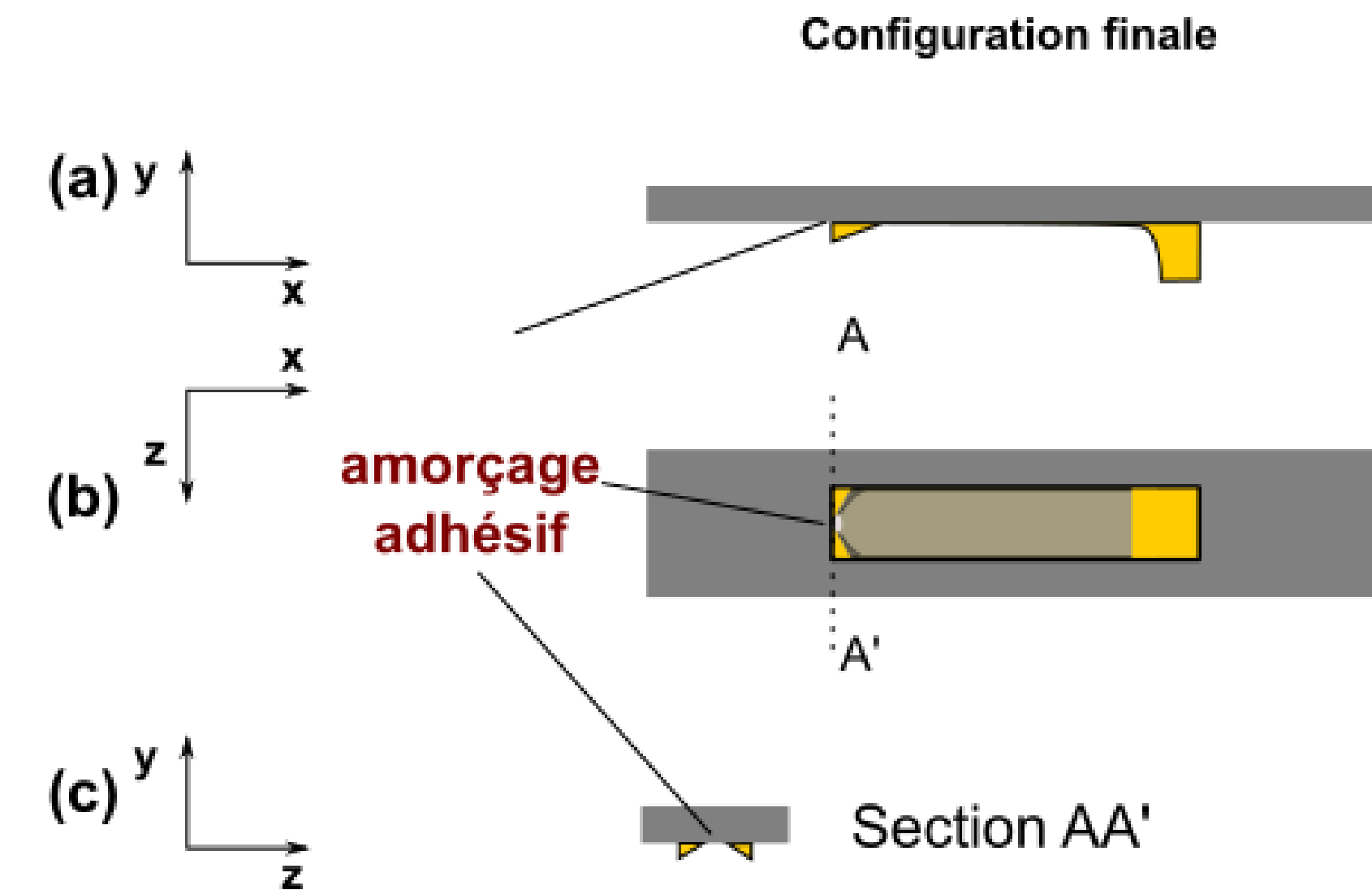


Transition de l'amorçage vers la propagation : 100 nm



# Rupture adhésive – analyse par MEB

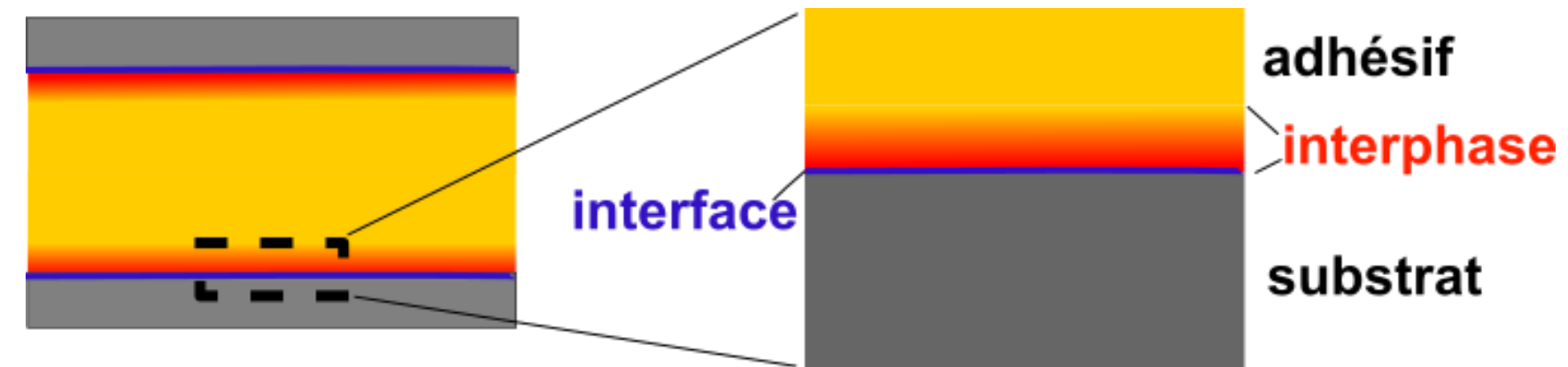
## Transition amorçage adhésif – propagation vers l'interphase



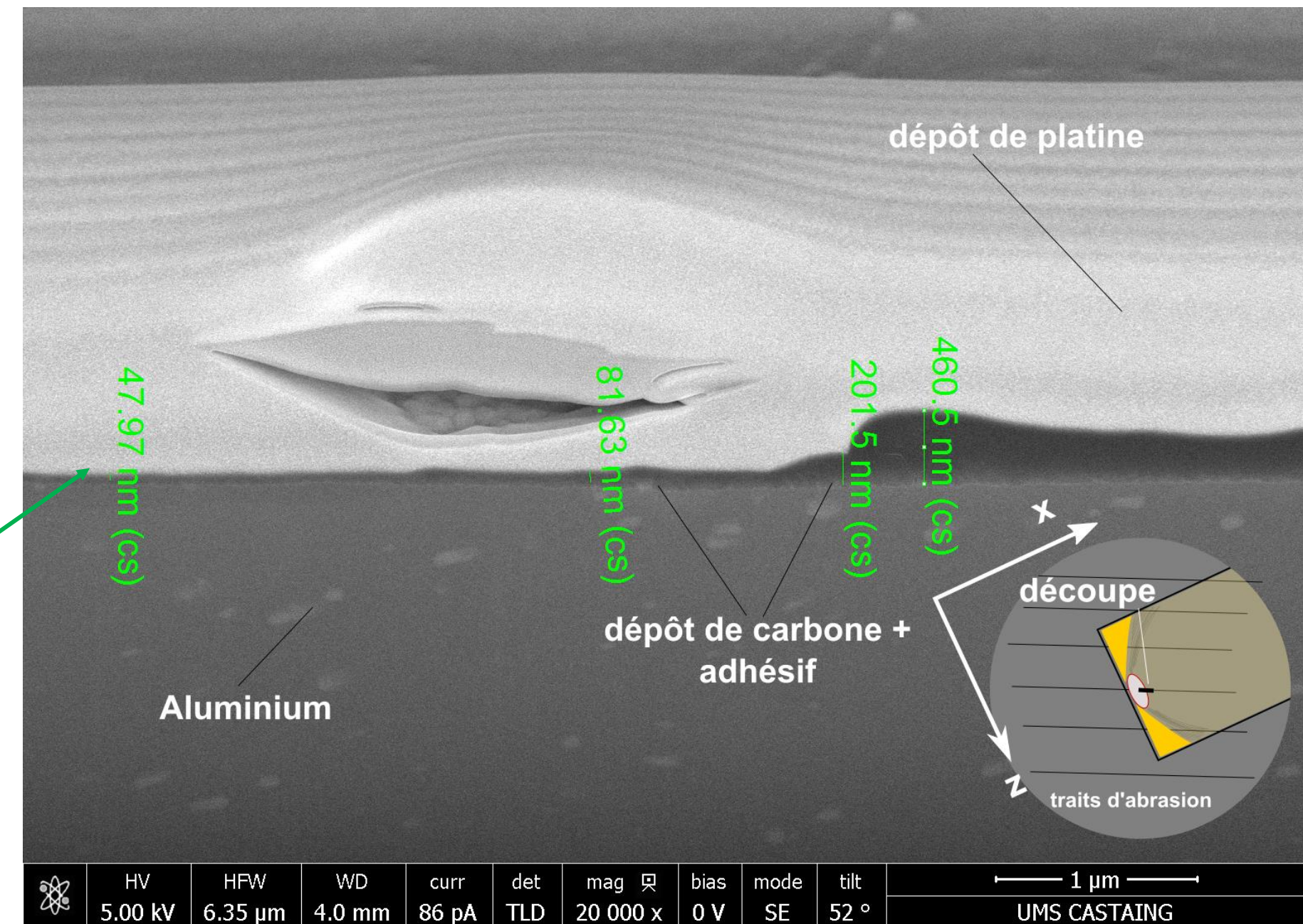


# Rupture adhésive – analyse par MEB + FIB

## Transition amorçage adhésif – propagation vers l'interphase



Épaisseur résiduelle de colle < 100 nm





# Caractérisation expérimentale

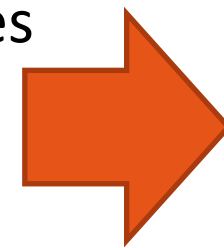
# Matrice d'essais

## Objectif : atteindre plusieurs niveaux d'adhérence

- Substrats : AA2024 – T3 – épaisseurs 1,08 mm et 1,62 mm
- Adhésive : DGEBA/DETA ( $r=1,0$ )

### Traitement de surface

- Acétone
- Acétone +  $\text{HNO}_3$ 
  - $T_{\text{amb}}$ , 50°C
  - Durée: 2 minutes, 10 minutes
- Acétone +  $\text{HNO}_3$  + boehmitage
  - $\text{HNO}_3$  (10 minutes à 50°C)
  - 30 minutes à 100°C



7 traitements  
réalisés

Répétable en  
termes d'état de  
surface ( $R_a$ )

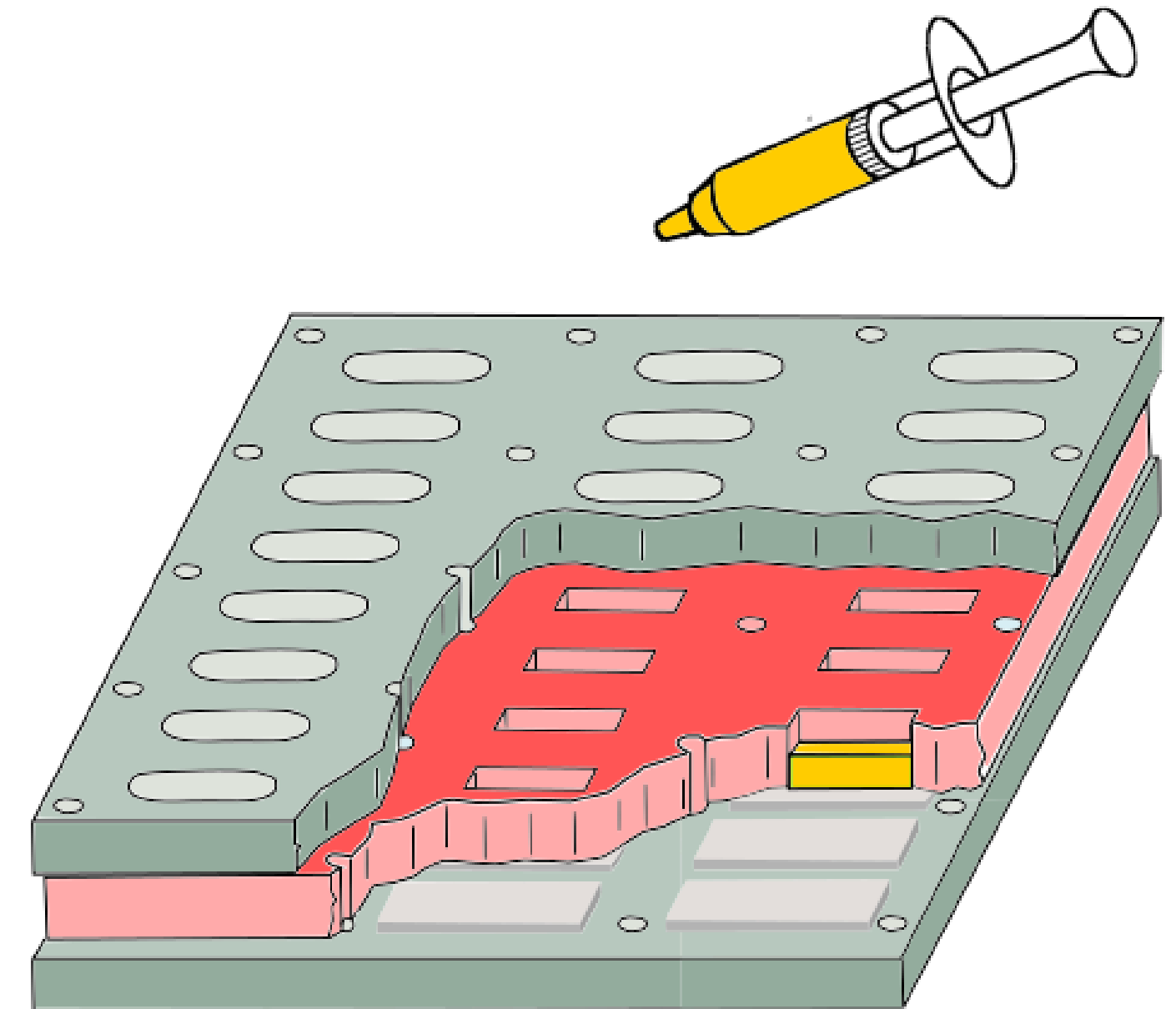
### Concentration organosilane

- 0%, 1% et 5% *phr*

### Cycle de polymérisation

- 1 heure à 140°C →  $T_{g\infty}=126^\circ\text{C}$

## Fabrication des éprouvettes





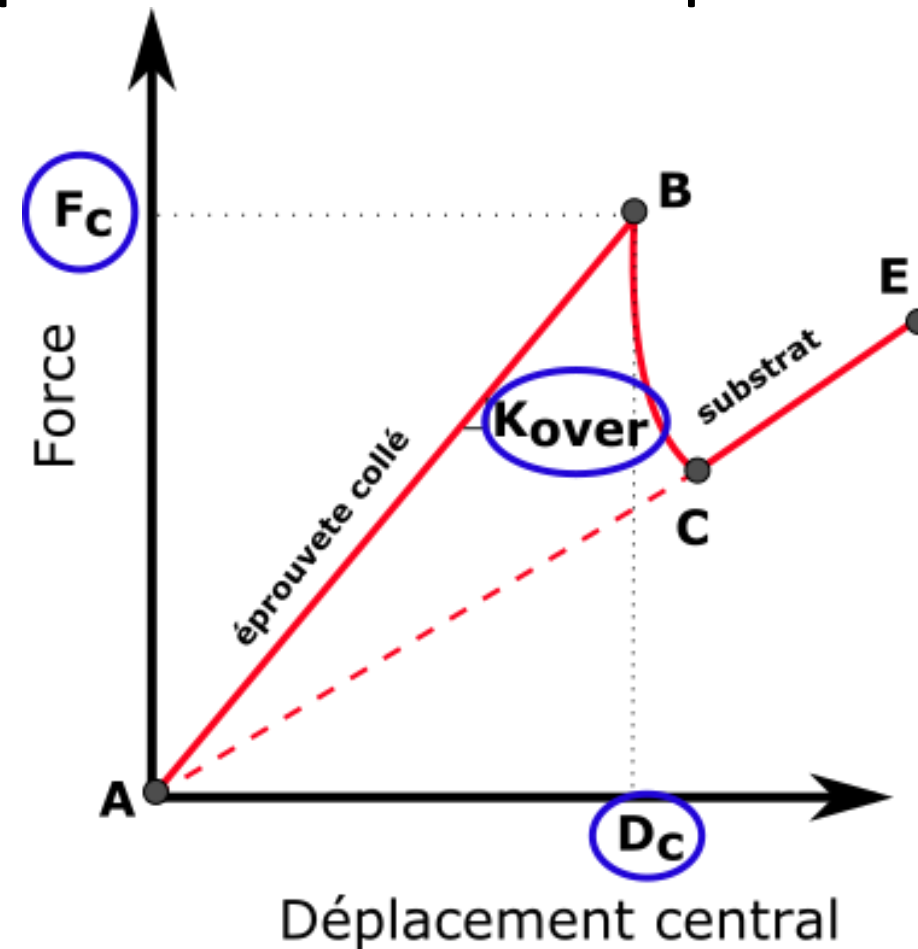
# Protocole de l'essai

Distance entre appuis:  $D_{sup}=33 \text{ mm}$  selon la norme

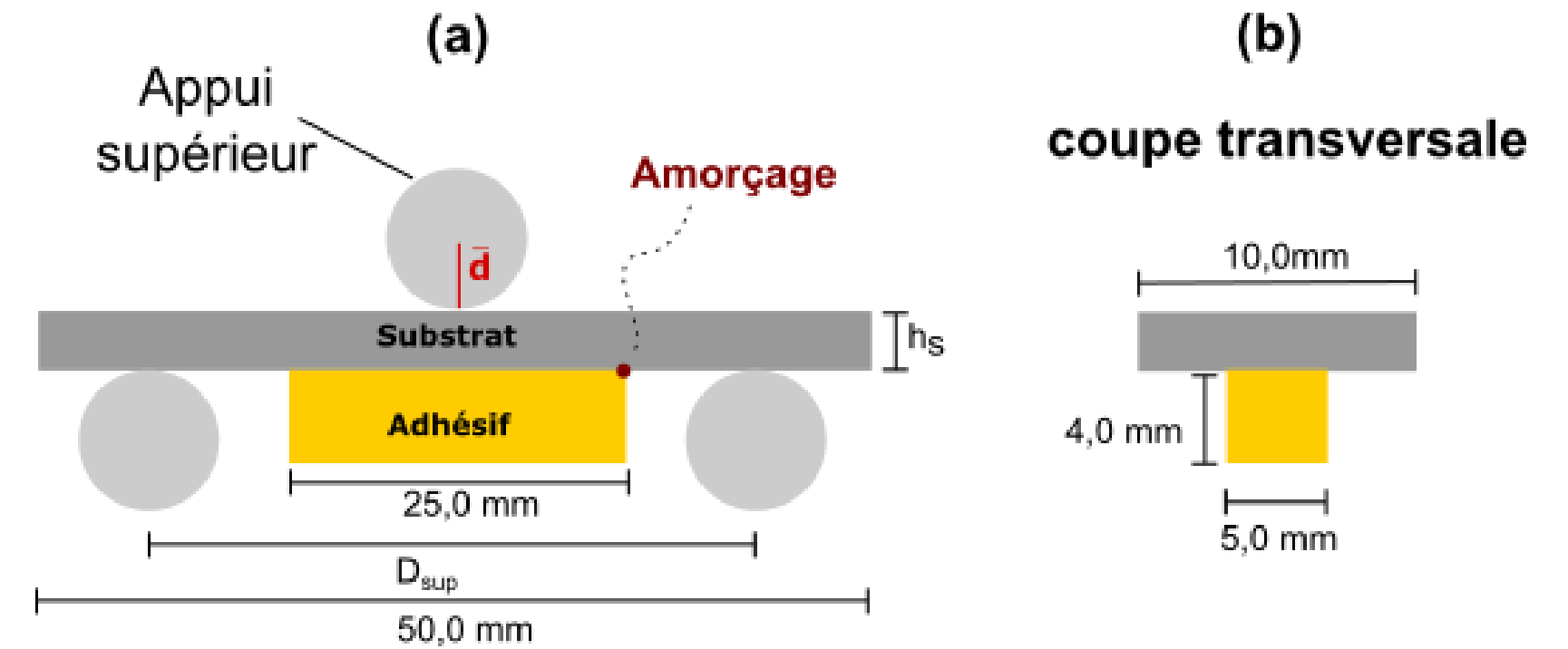
Vitesse: 0,5 mm/min

Instrumentation requise

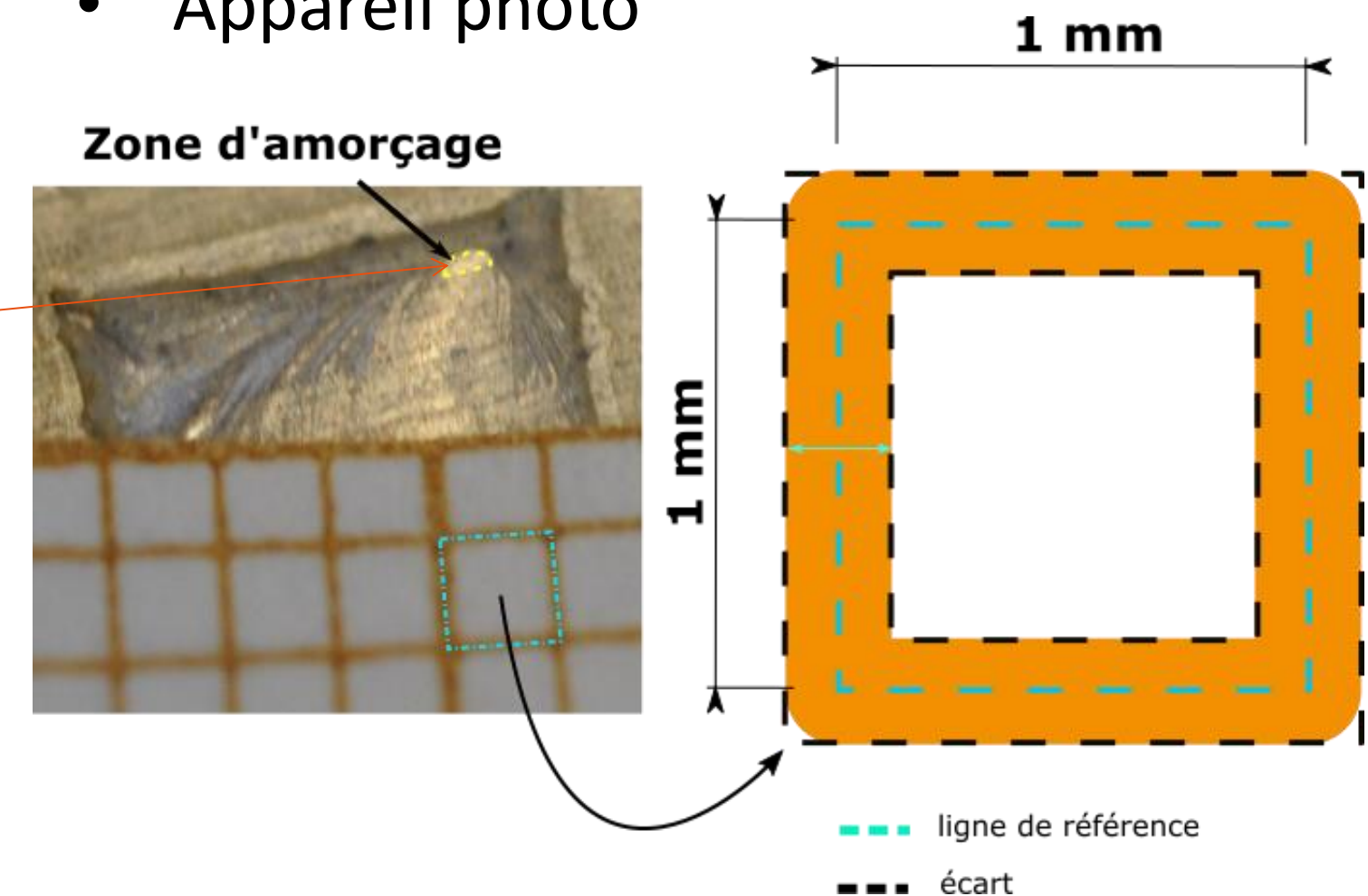
- Capteur de force et déplacement



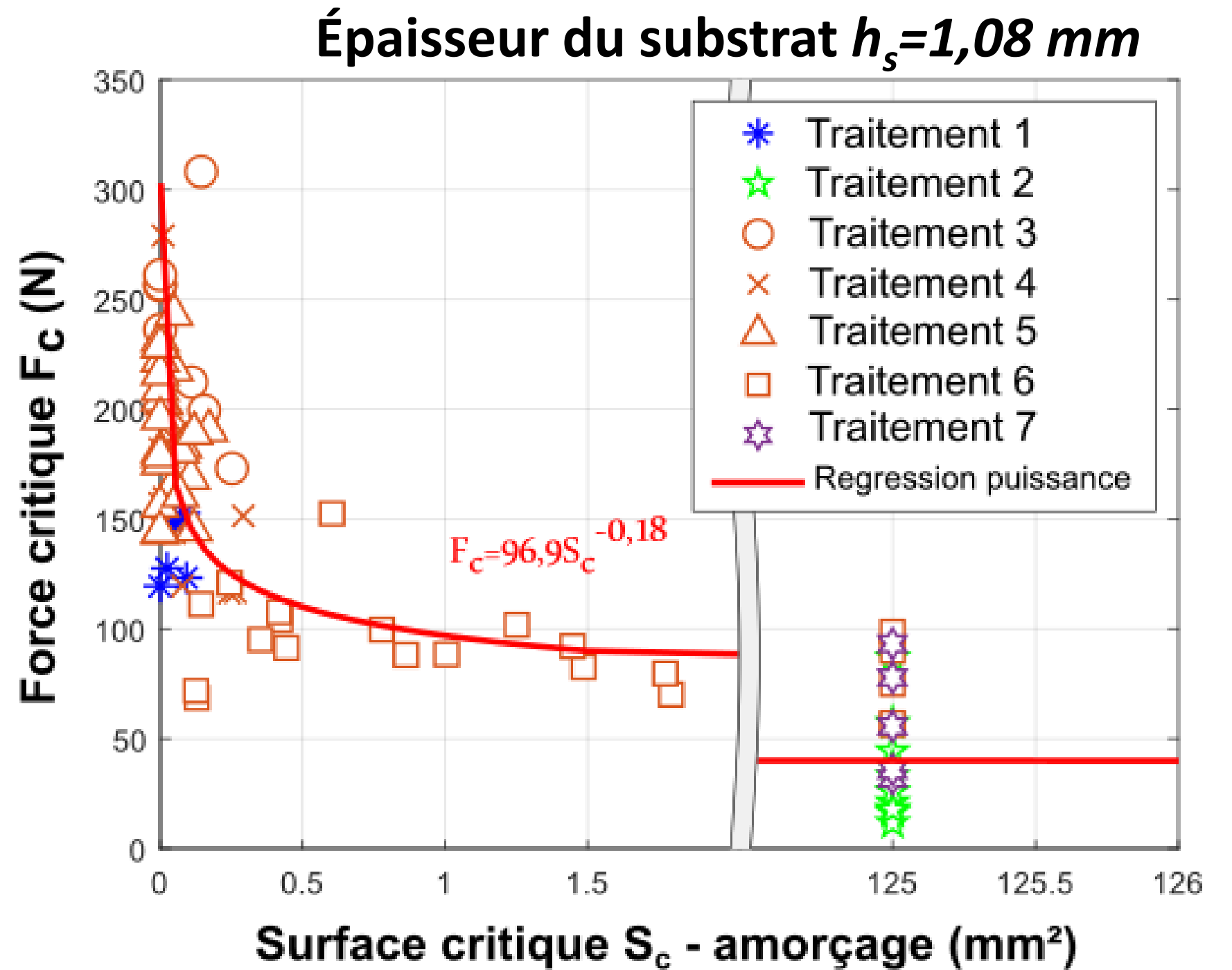
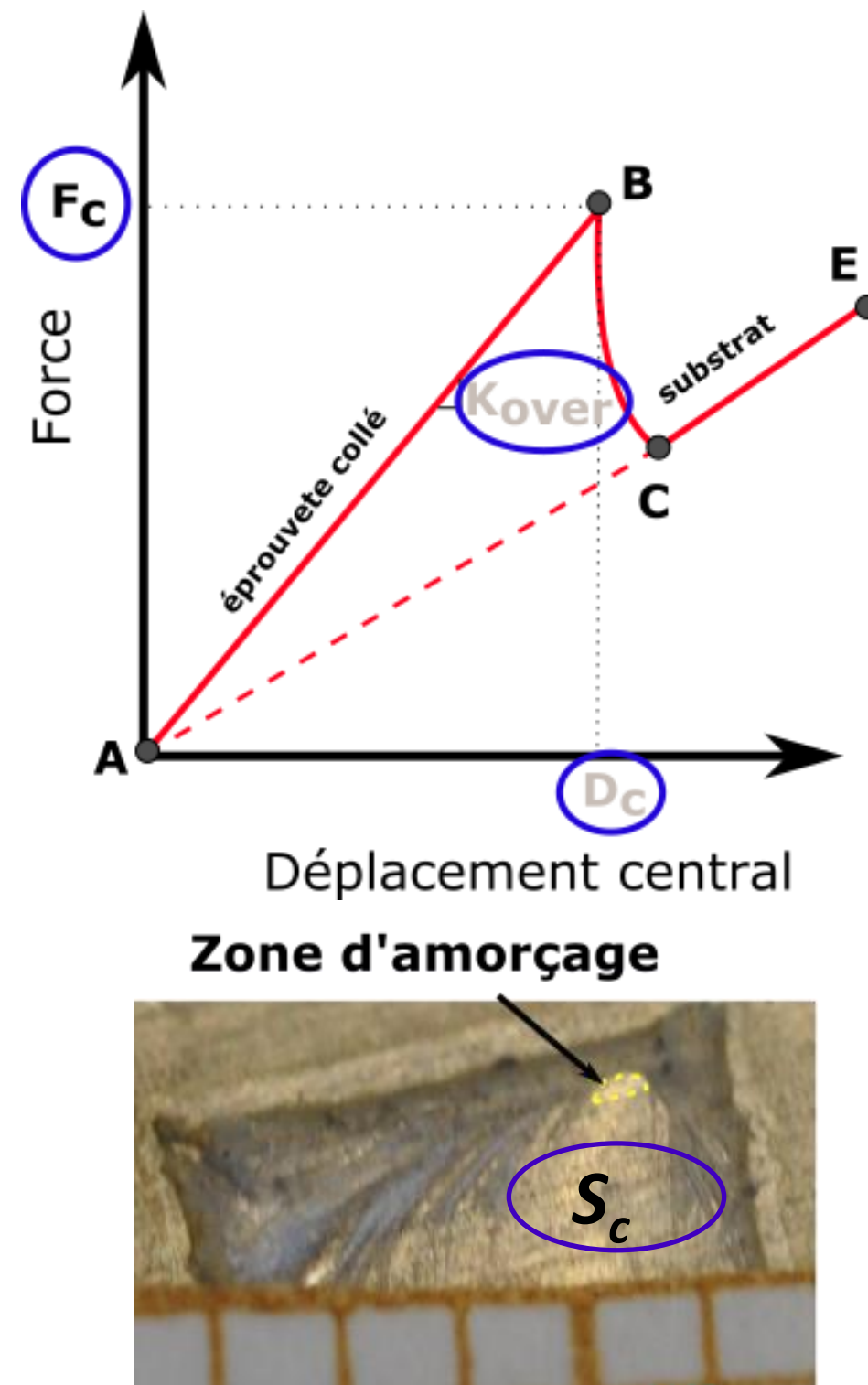
$S_c$



- Appareil photo

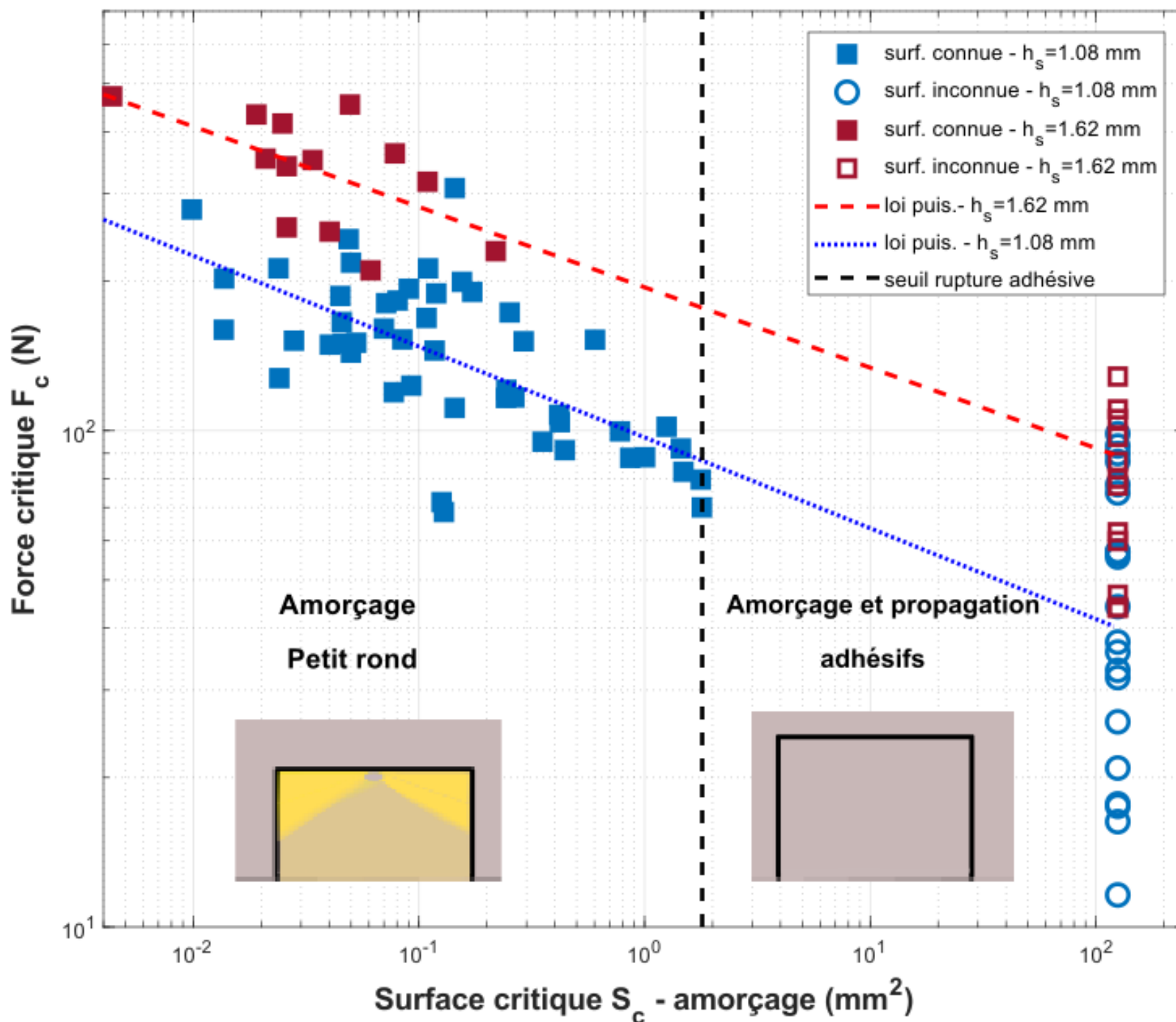


# Mesure de la taille d'amorçage ( $S_c$ ) et de la force critique ( $F_c$ )



**Loi puissance**

# Mesure de la taille d'amorçage ( $S_c$ ) et de la force critique ( $F_c$ ) – log x log



$$h_s=1,62 \text{ mm}$$

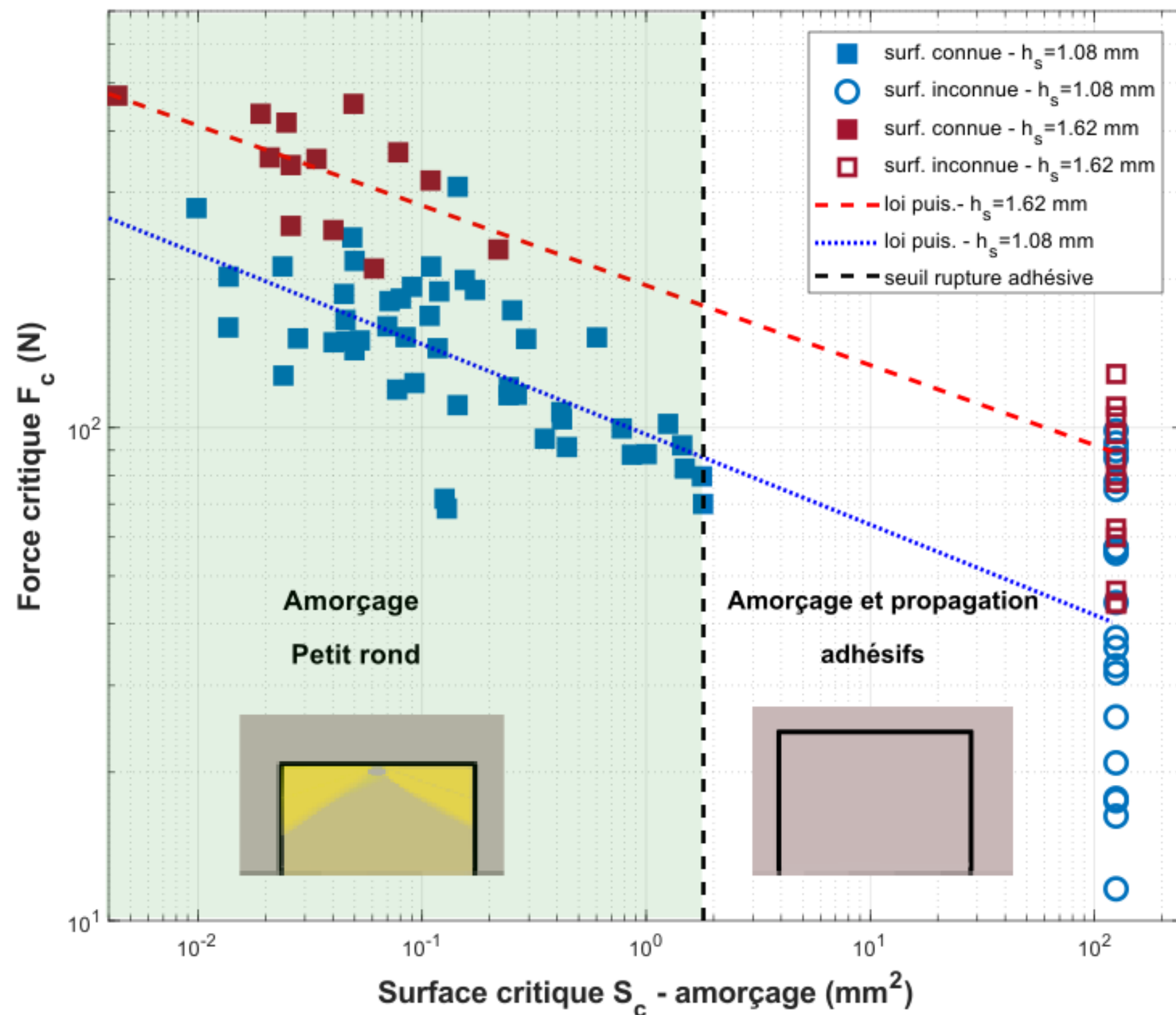
$$F_c=194 \cdot S_c^{-0,16}$$

$$h_s=1,08 \text{ mm}$$

$$F_c=97 \cdot S_c^{-0,18}$$

- ✓ La conclusion est similaire pour d'autres épaisseurs
- ✓ Le faciès de rupture dépend de la surface d'amorçage et de la force critique

# Mesure de la taille d'amorçage ( $S_c$ ) et de la force critique ( $F_c$ ) – log x log



$$h_s = 1,62 \text{ mm}$$

$$F_c = 194 \cdot S_c^{-0,16}$$

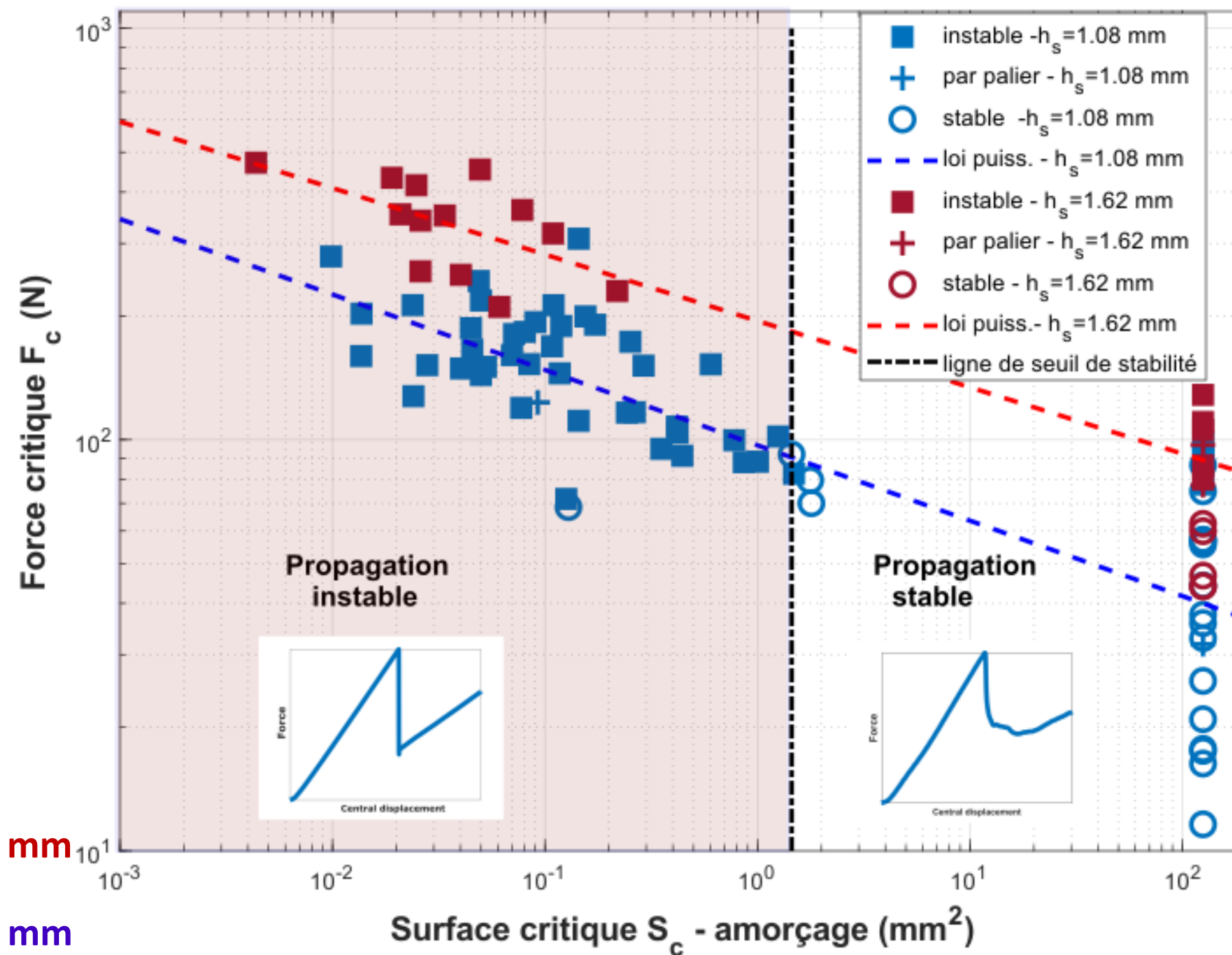
$$h_s = 1,08 \text{ mm}$$

$$F_c = 97 \cdot S_c^{-0,18}$$

- ✓ La conclusion est similaire pour d'autres épaisseurs
- ✓ Le faciès de rupture dépend de la surface d'amorçage et de la force critique
- ✓ Tendance à l'amorçage cohésif pour une force très élevée
- ✓ Valeur limite de l'apparition du « petit rond » :
  - $0,005 \text{ mm}^2 \leq S_c \leq 1,8 \text{ mm}^2$



# Mesure de la taille d'amorçage ( $S_c$ ) et de la force critique ( $F_c$ ) – log x log



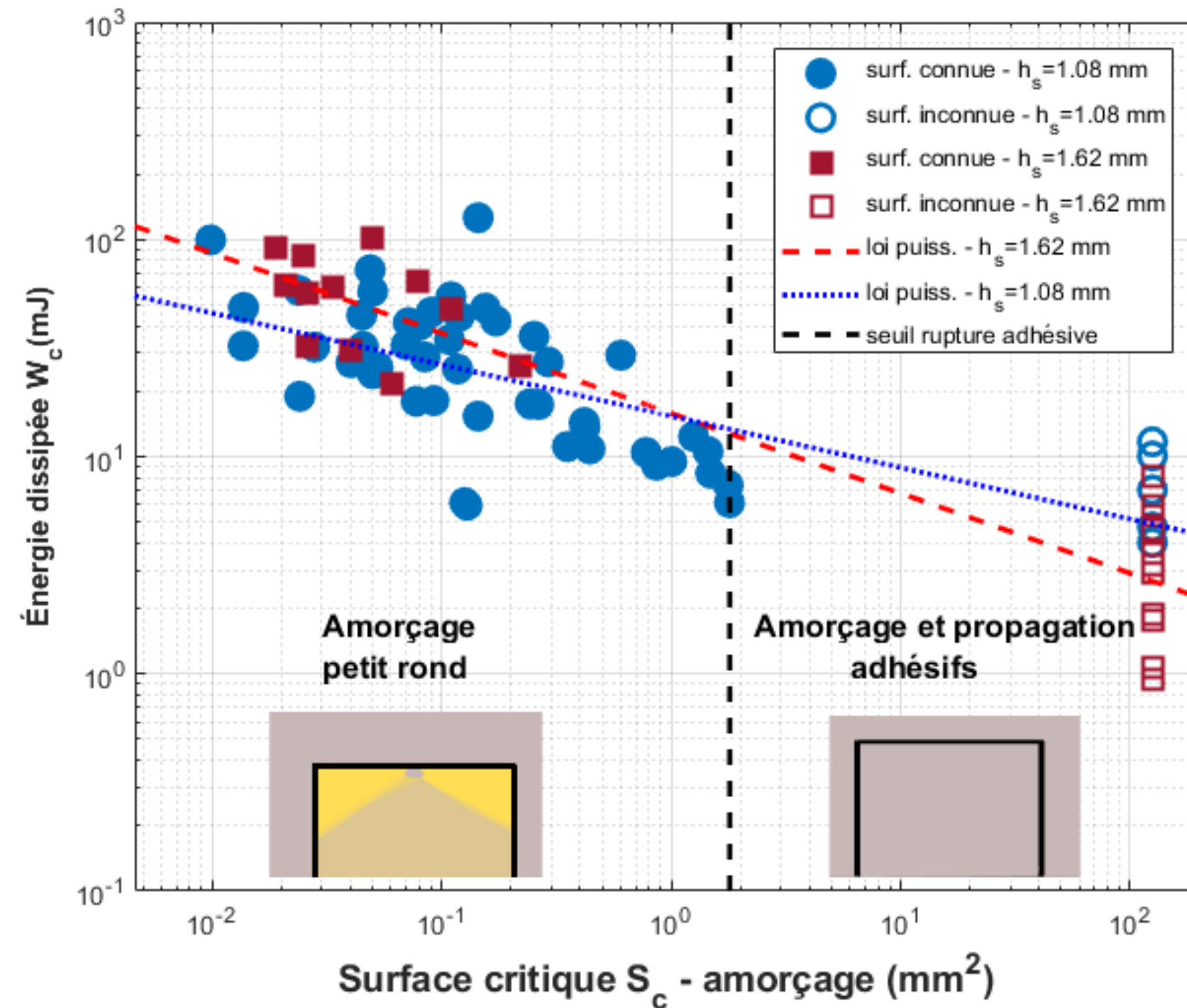
- ✓ Le type de propagation obtenu dépend de la surface d'amorçage et de la force critique

$$F_c = 194 \cdot S_c^{-0,16}$$

$$F_c = 97 \cdot S_c^{-0,18}$$

- ✓ Valeur limite de la stabilité :
- $S_c \leq 1,45 \text{ mm}^2$

# Mesure de la taille d'amorçage ( $S_c$ ) et l'énergie ( $W_c$ ) – log x log



$$h_s = 1,08 \text{ mm}$$

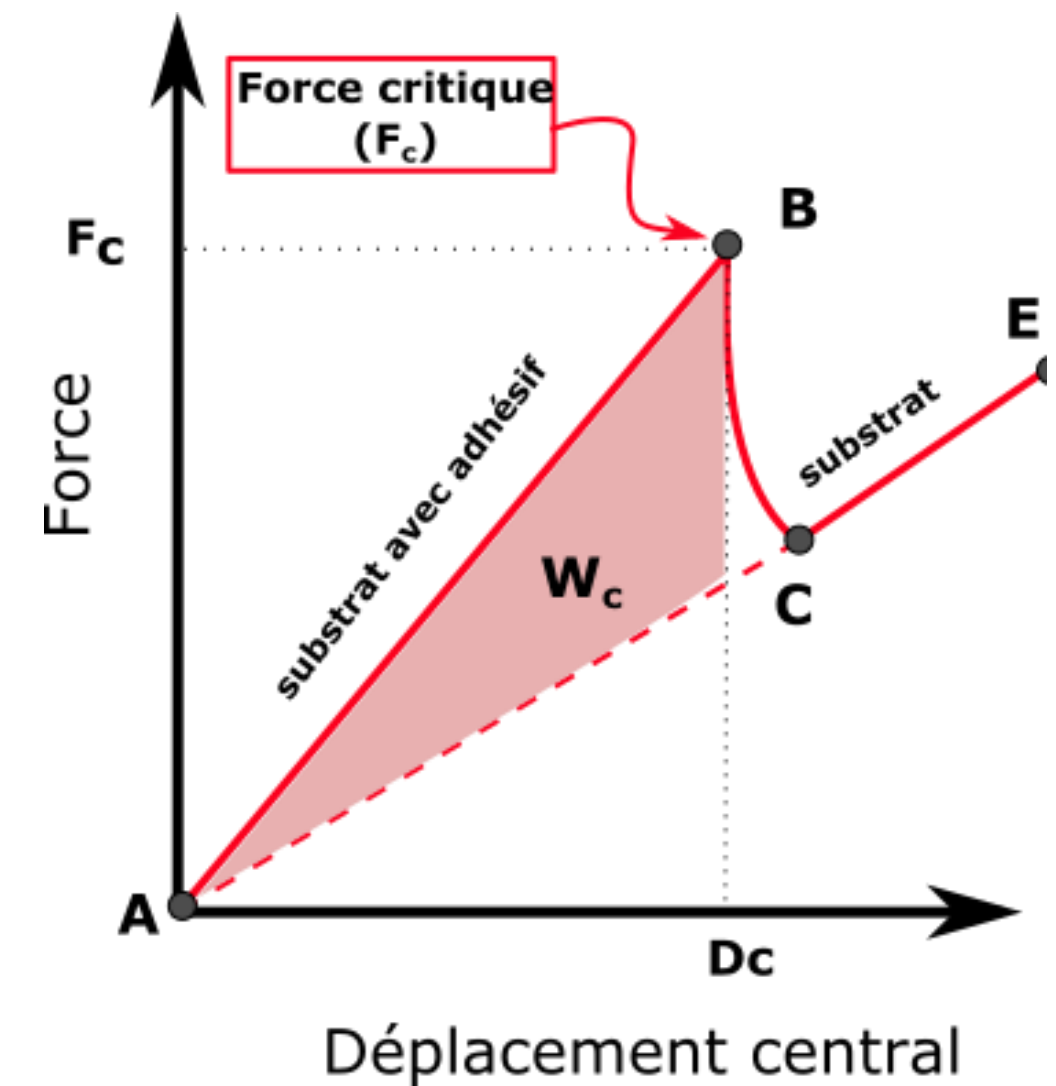
$$W_c = 15,4 \cdot S_c^{-0,24}$$

$$h_s = 1,62 \text{ mm}$$

$$W_c = 158 \cdot S_c^{-3,68}$$

Énergie dissipée ( $W_c$ ) - **ISO 14679:1997** :

- Approche encore limitée



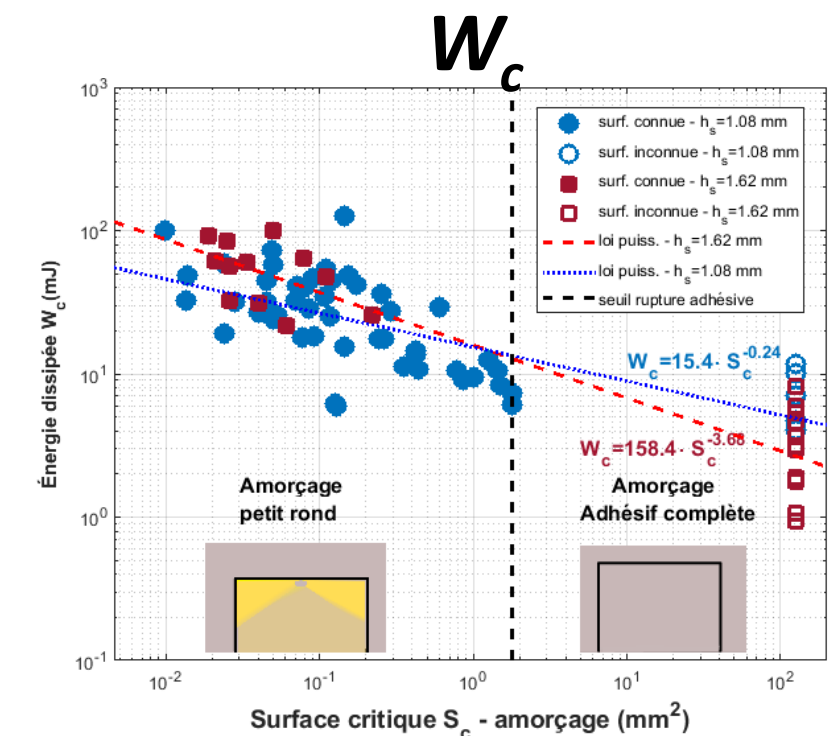
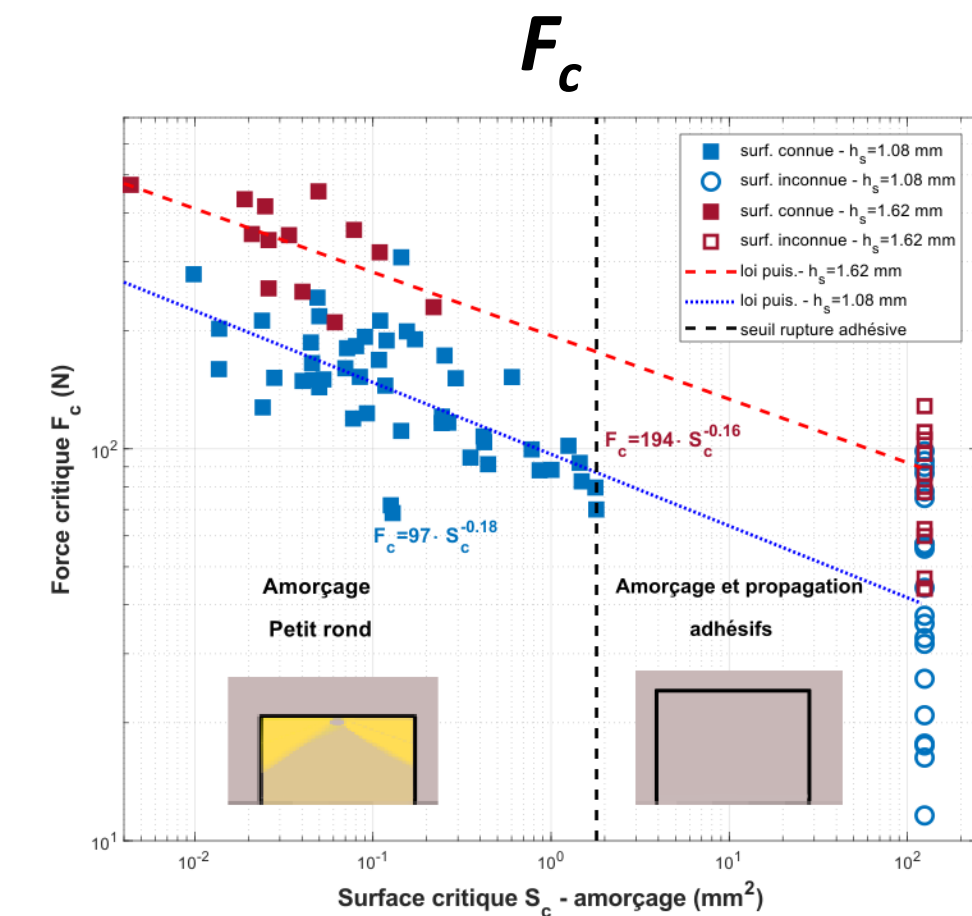
# Conclusion des résultats expérimentaux

- ❑ Ni  $F_c$  ni  $W_c$  ne sont des propriétés indépendantes de la géométrie
- ❑ Les mécanismes d'amorçage et propagation dépendent de la force et de la taille d'amorçage de fissure
- ❑  $F_c$  peut être évaluée directement grâce à la mesure de  $S_c$



$F_c$  et  $S_c$  doivent être utilisées ensemble pour déterminer les propriétés mécaniques pour l'amorçage de fissure

Comment améliorer le traitement des résultats ?



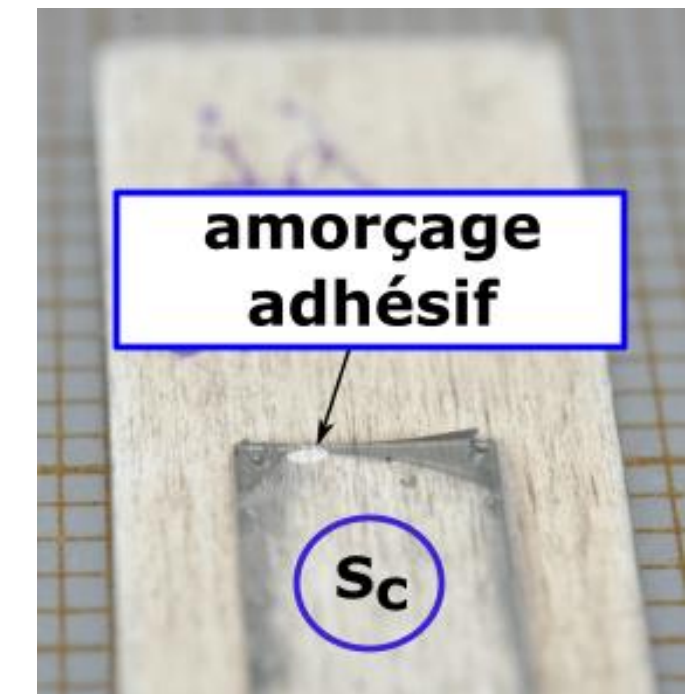
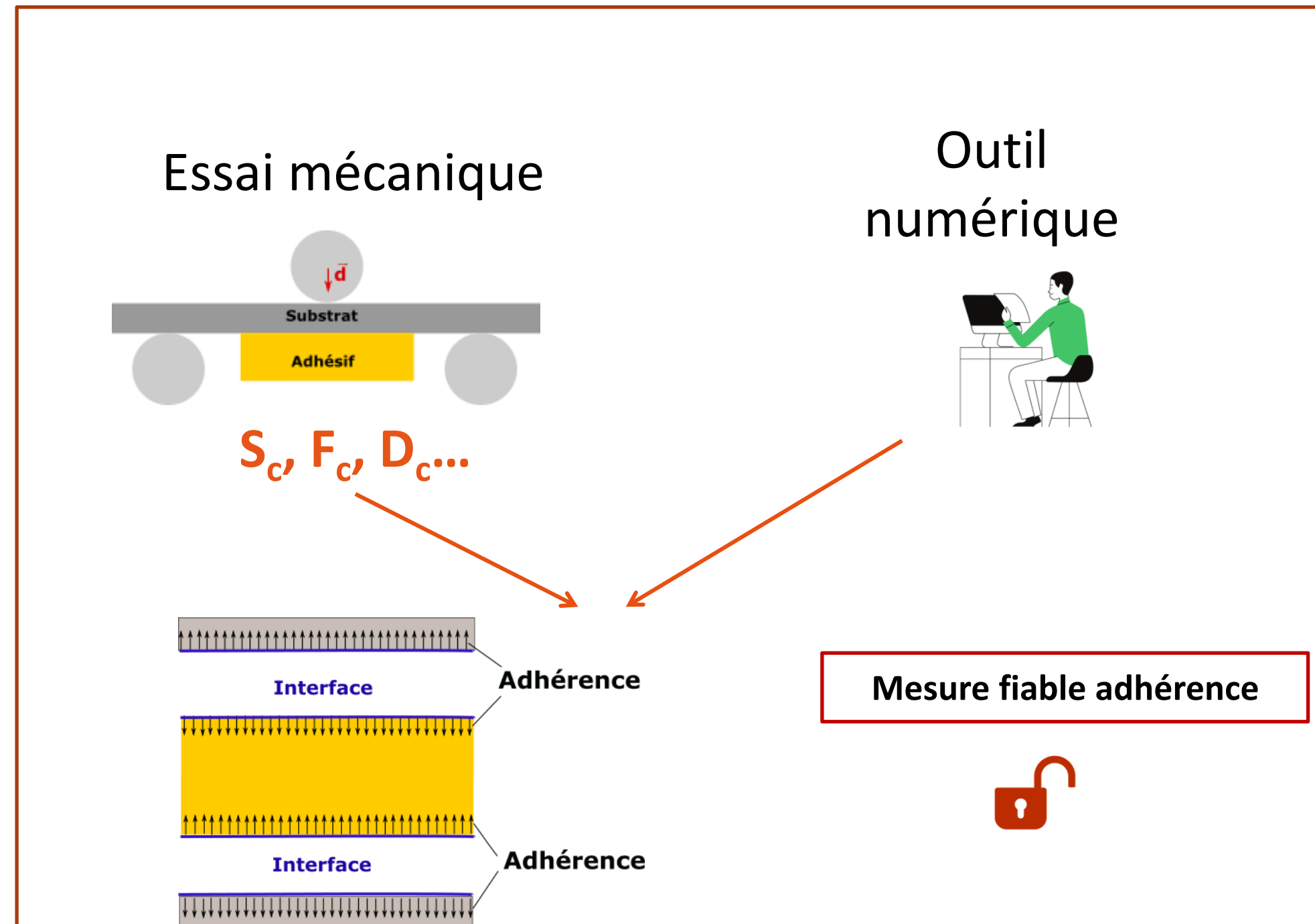
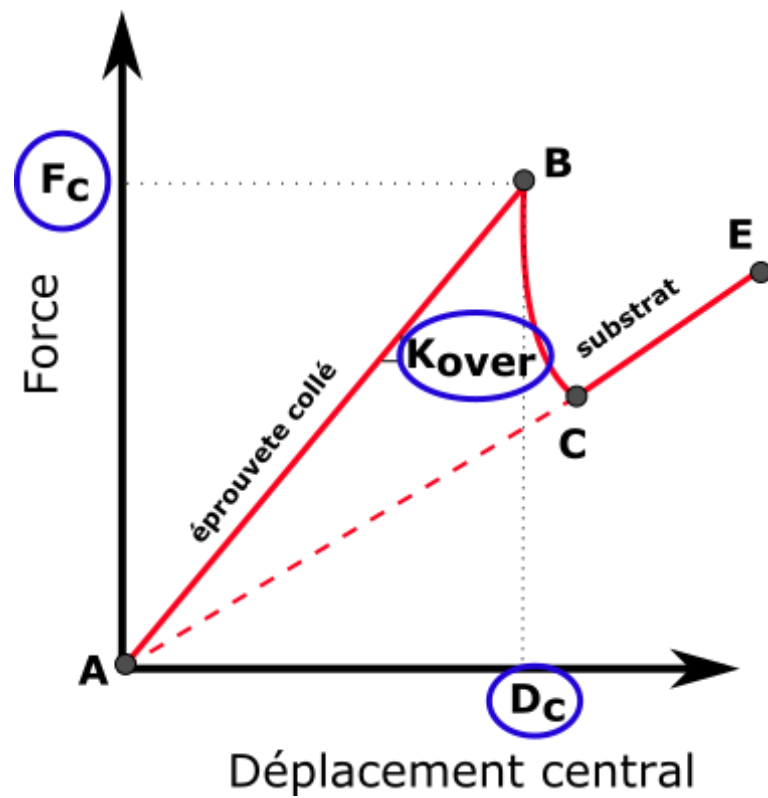


# Approche numérique

- **Méthodologie**
- **Résultats**
- **Limitations**

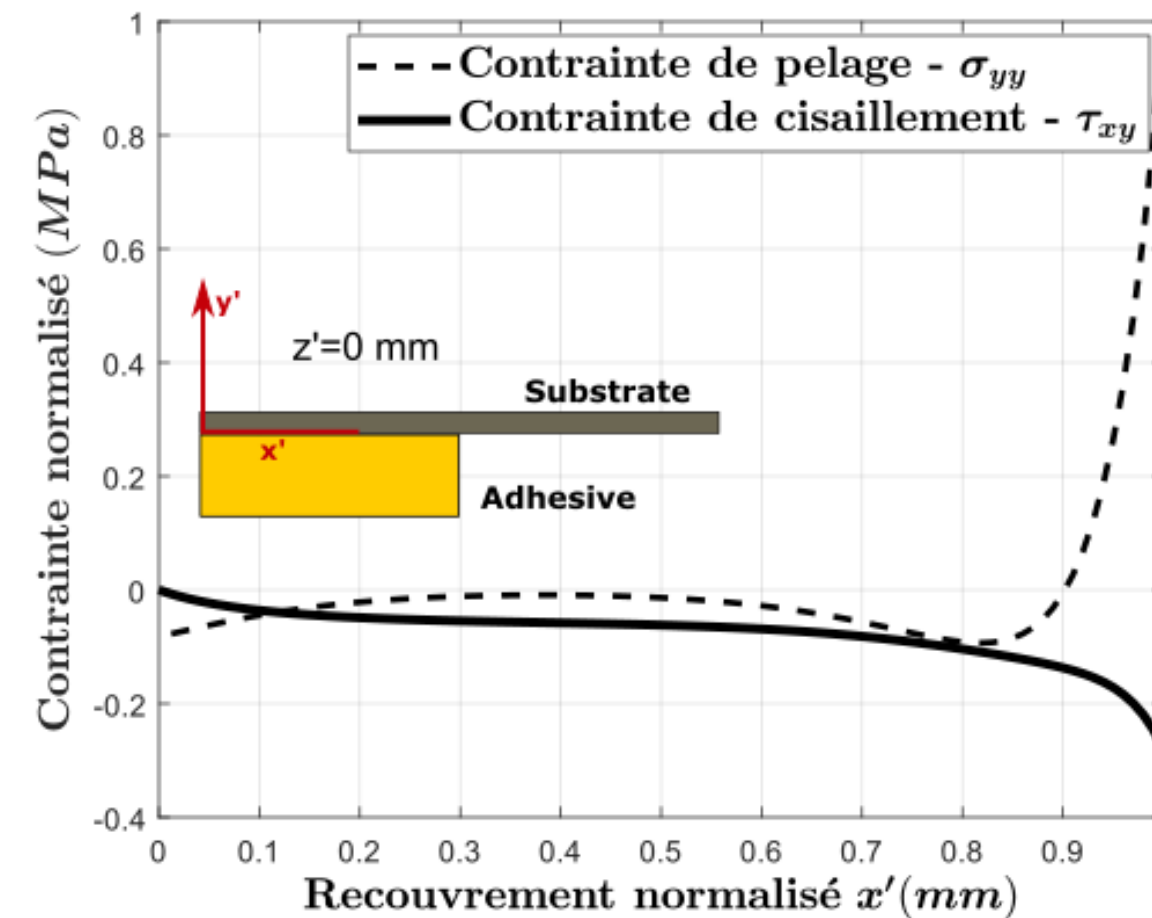
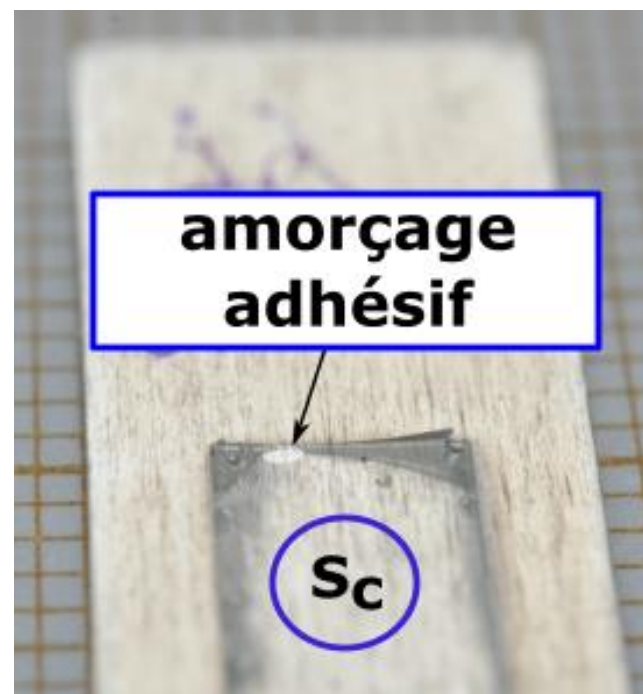


# Comment améliorer le traitement des résultats ?



# Amorçage en flexion - le critère couplé (CC)

Bouchet et al. (2002), Sauvage et al. (2019) : *concentration de contrainte + énergie (non couplées)*



Utilisation d'une approche qui considère **la taille d'amorçage** et une **concentration de contrainte**

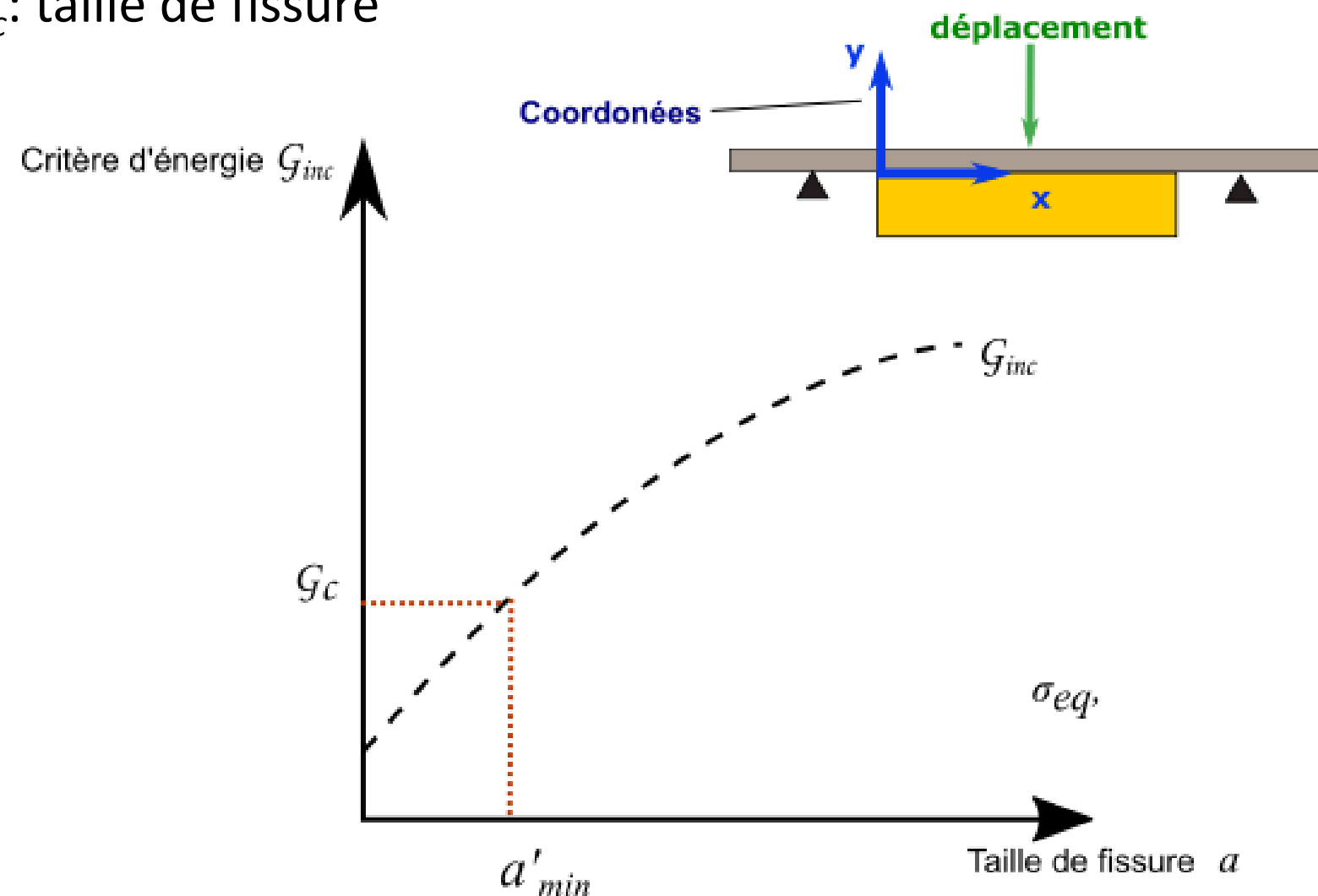
➡ **Leguillon (2002)** : un seul critère (énergie ou contrainte) n'est pas suffisant

# Amorçage en flexion - le critère couplé (CC)

Utilisation d'une approche qui considère **la taille d'amorçage** et une **concentration de contrainte**  
**Leguillon (2002)** : un seul critère (énergie ou contrainte) n'est pas suffisant

## Critère d'énergie

$a_c$ : taille de fissure



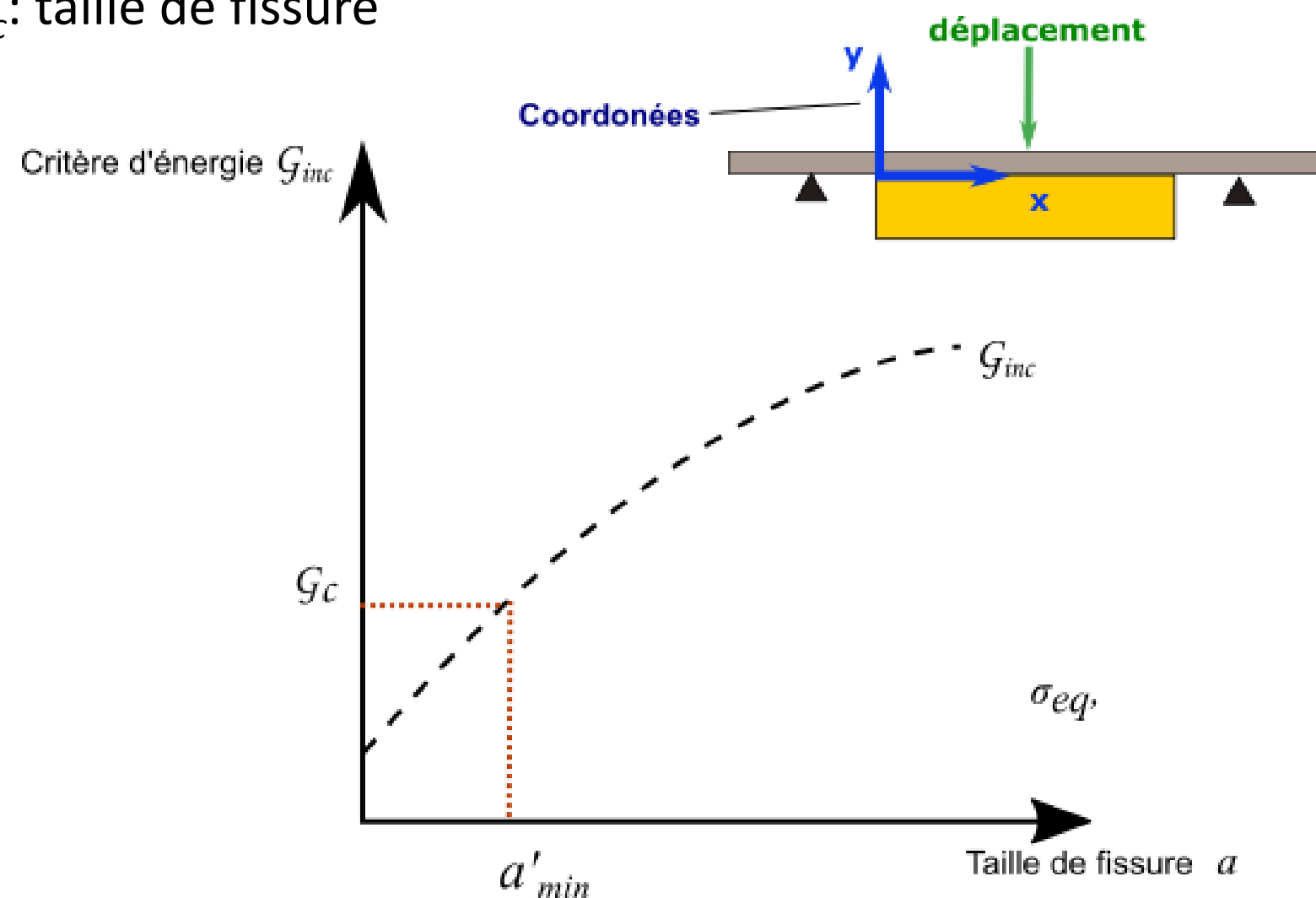


# Amorçage en flexion - le critère couplé (CC)

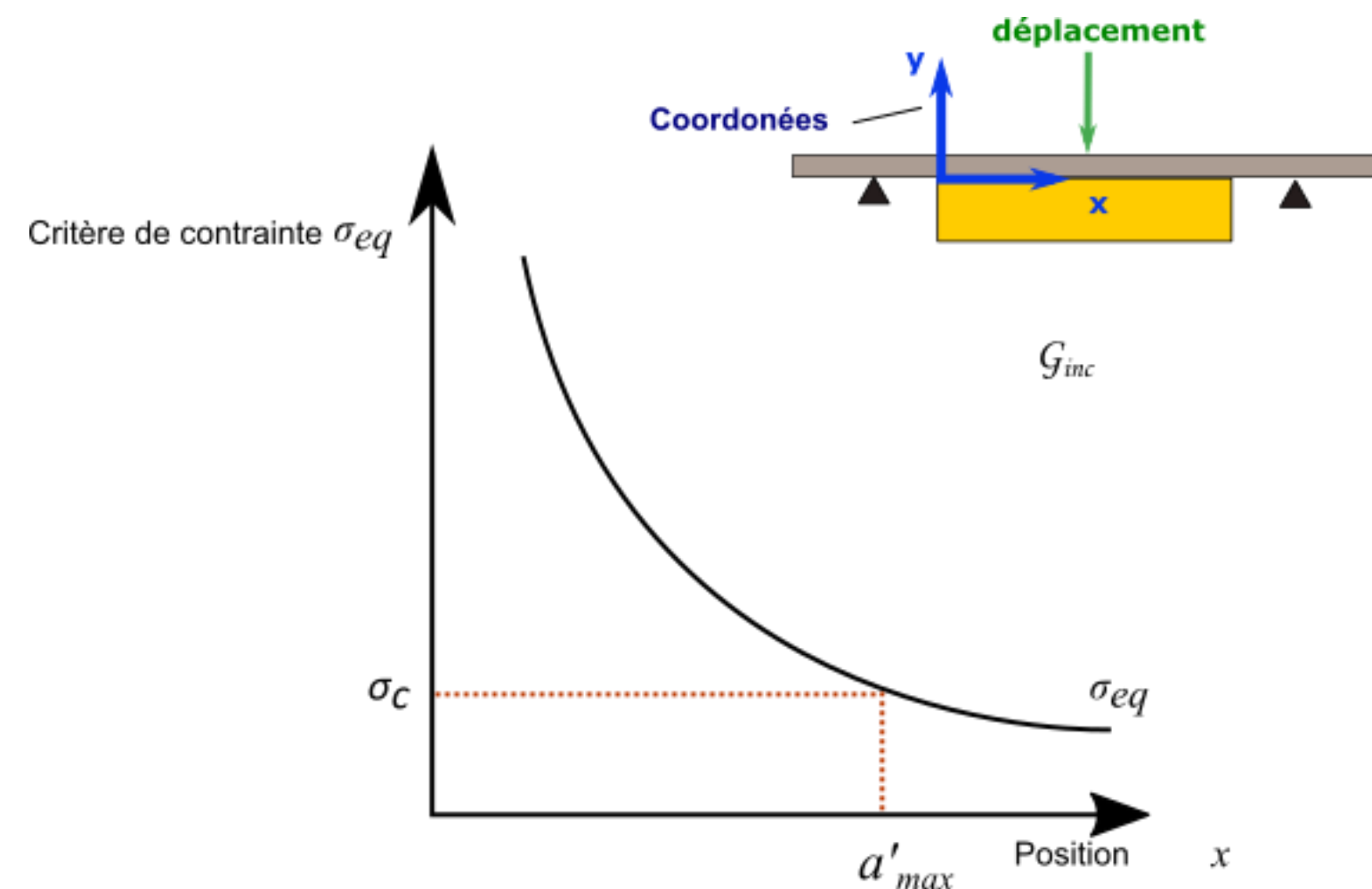
Utilisation d'une approche qui considère **la taille d'amorçage** et une **concentration de contrainte**  
**Leguillon (2002)** : un seul critère (énergie ou contrainte) n'est pas suffisant

## Critère d'énergie

$a_c$ : taille de fissure



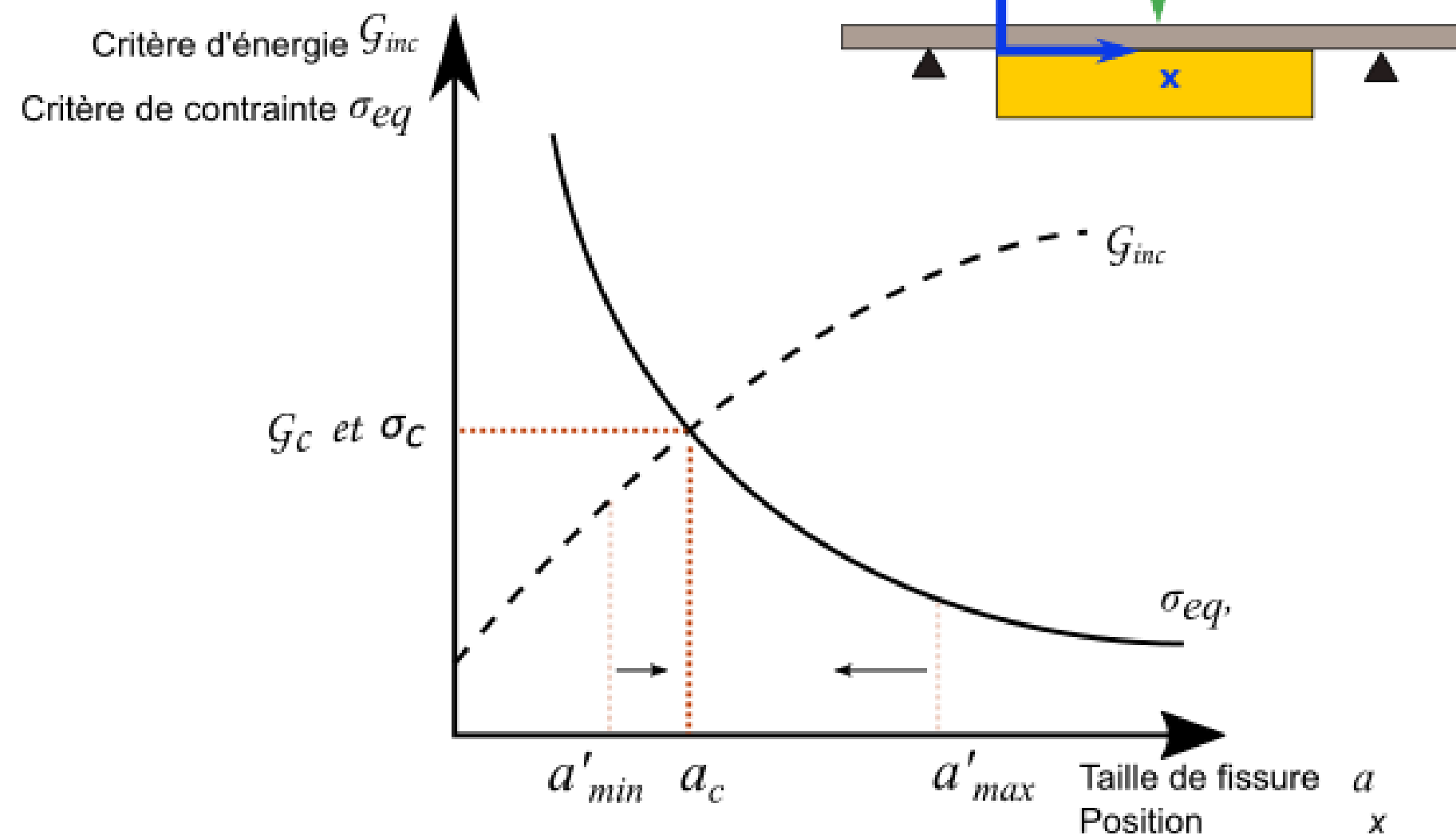
## Critère de contrainte



# Amorçage en flexion - le critère couplé (CC)

Utilisation d'une approche qui considère **la taille d'amorçage** et une **concentration de contrainte**  
**Leguillon (2002)** : *un seul critère (énergie ou contrainte) n'est pas suffisant*

$a_c$ : taille de fissure



Propriétés interfaciales  
connues

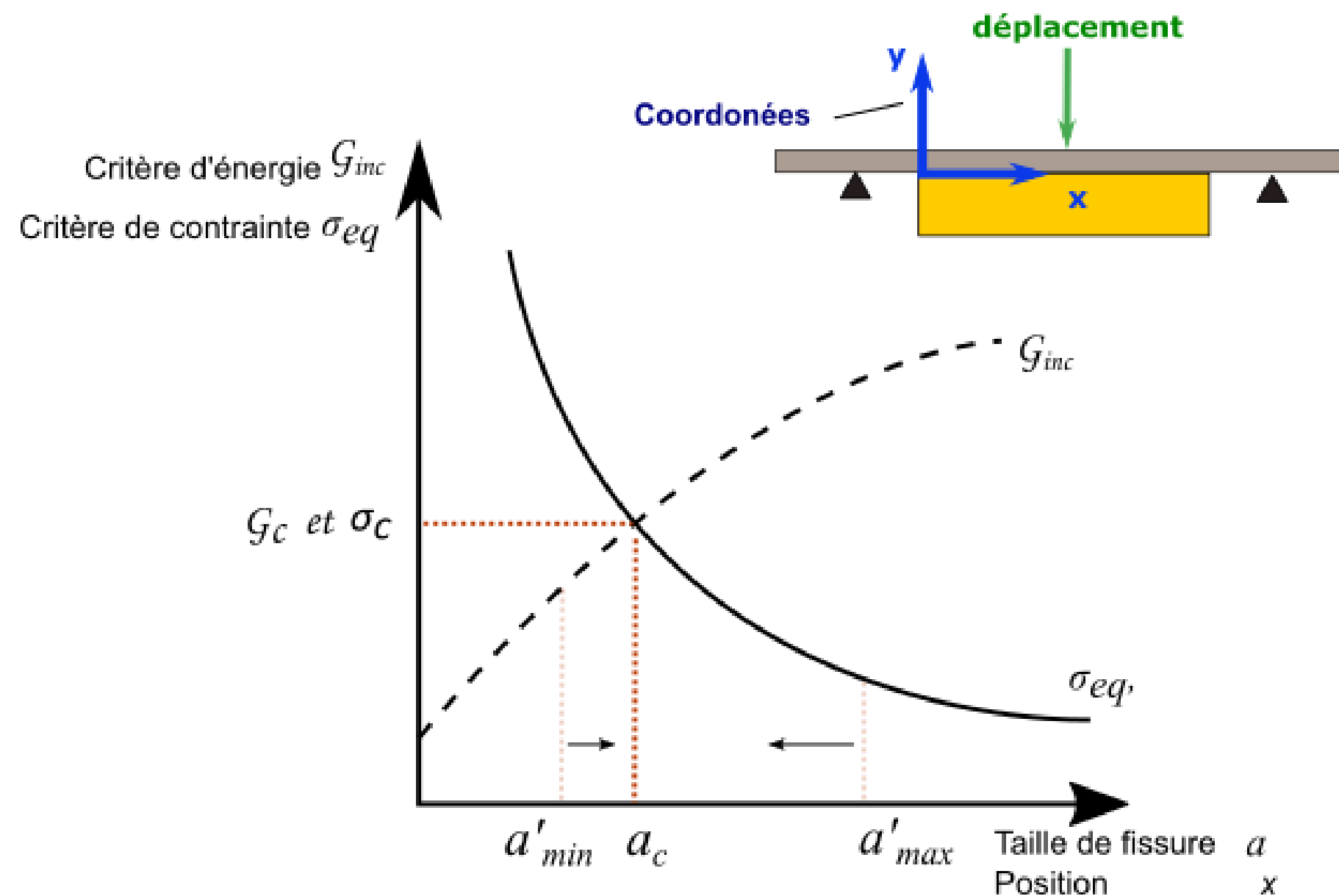


Détermination de la  
force minimale qui va  
satisfaire les deux  
critères -  $F_c$  (ou  $D_c$ ) et  $a_c$

# Amorçage en flexion - le critère couplé (CC)

Utilisation d'une approche qui considère **la taille d'amorçage** et une **concentration de contrainte**  
**Leguillon (2002)** : *un seul critère (énergie ou contrainte) n'est pas suffisant*

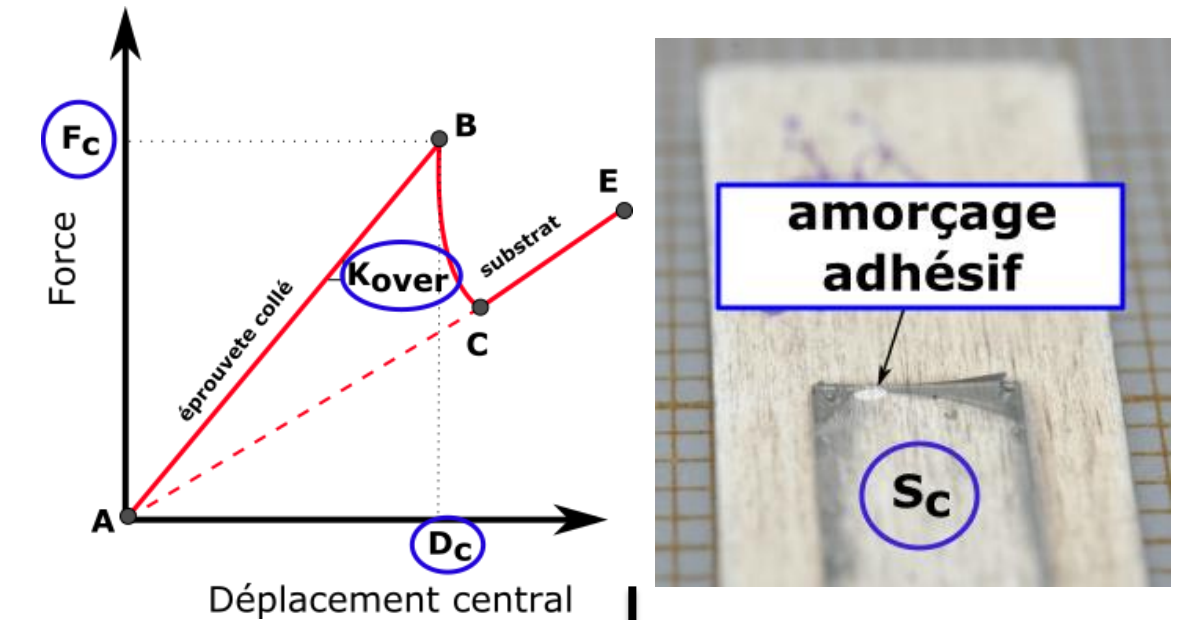
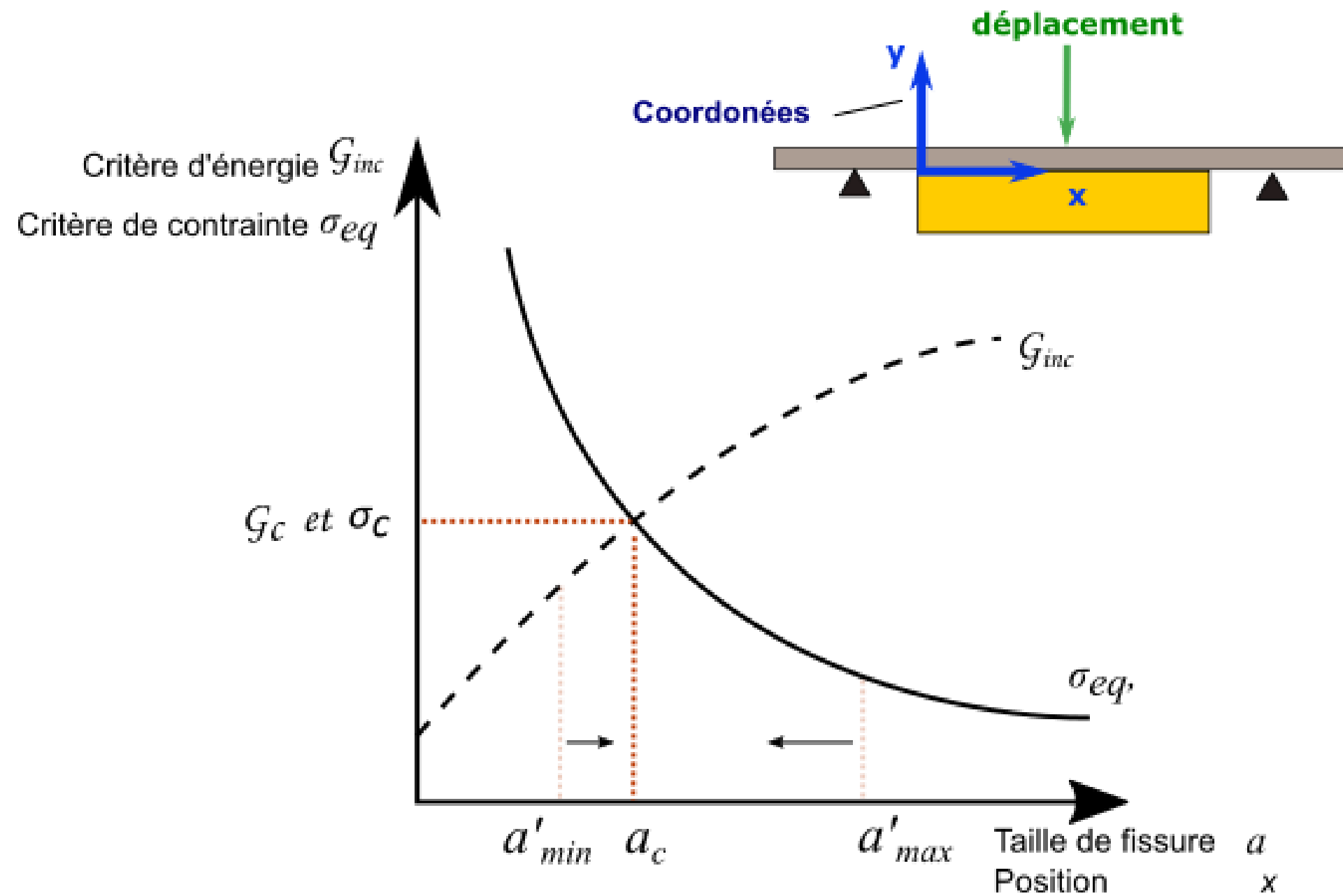
$a_c$ : taille de fissure



Propriétés interfaciales  
connues

Détermination de la  
force minimale qui va  
satisfaire les deux  
critères -  $F_c$  (ou  $D_c$ ) et  $a_c$

# Amorçage en flexion - le critère couplé (CC)



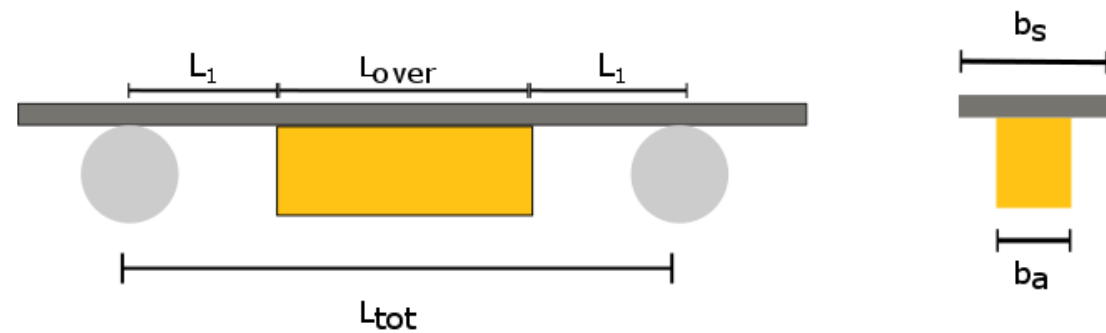
Outil numérique + CC



$\sigma_c$  et  $\mathcal{G}_c$

# Simulation de l'essai

## Solution analytique – 1D

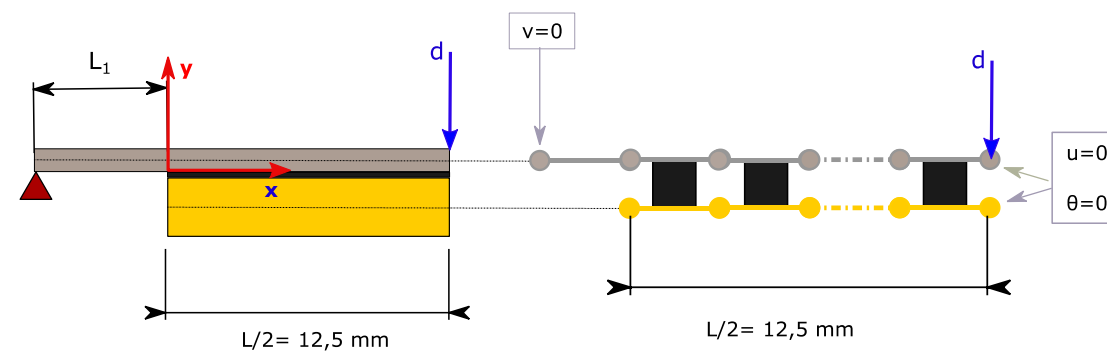


Très rapide



Solution limitée : raideur très élevée (**Roche et al. 1986**)

## Macroéléments – 1D

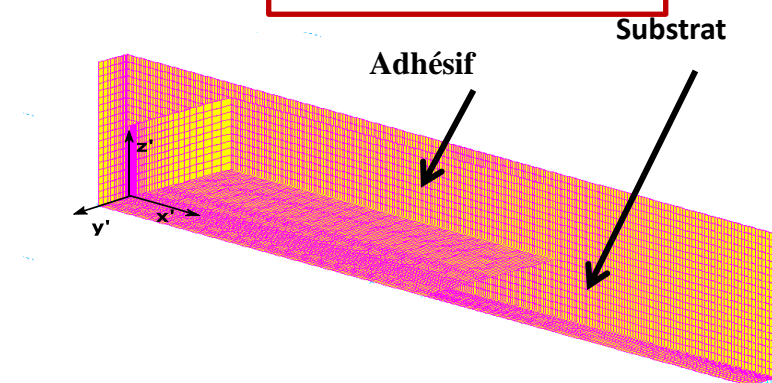


Rapide



Solution semi-analytique :  
**Pré-dimensionnement**  
(**Paroissien et al. 2013**)

## Éléments finis



Lente

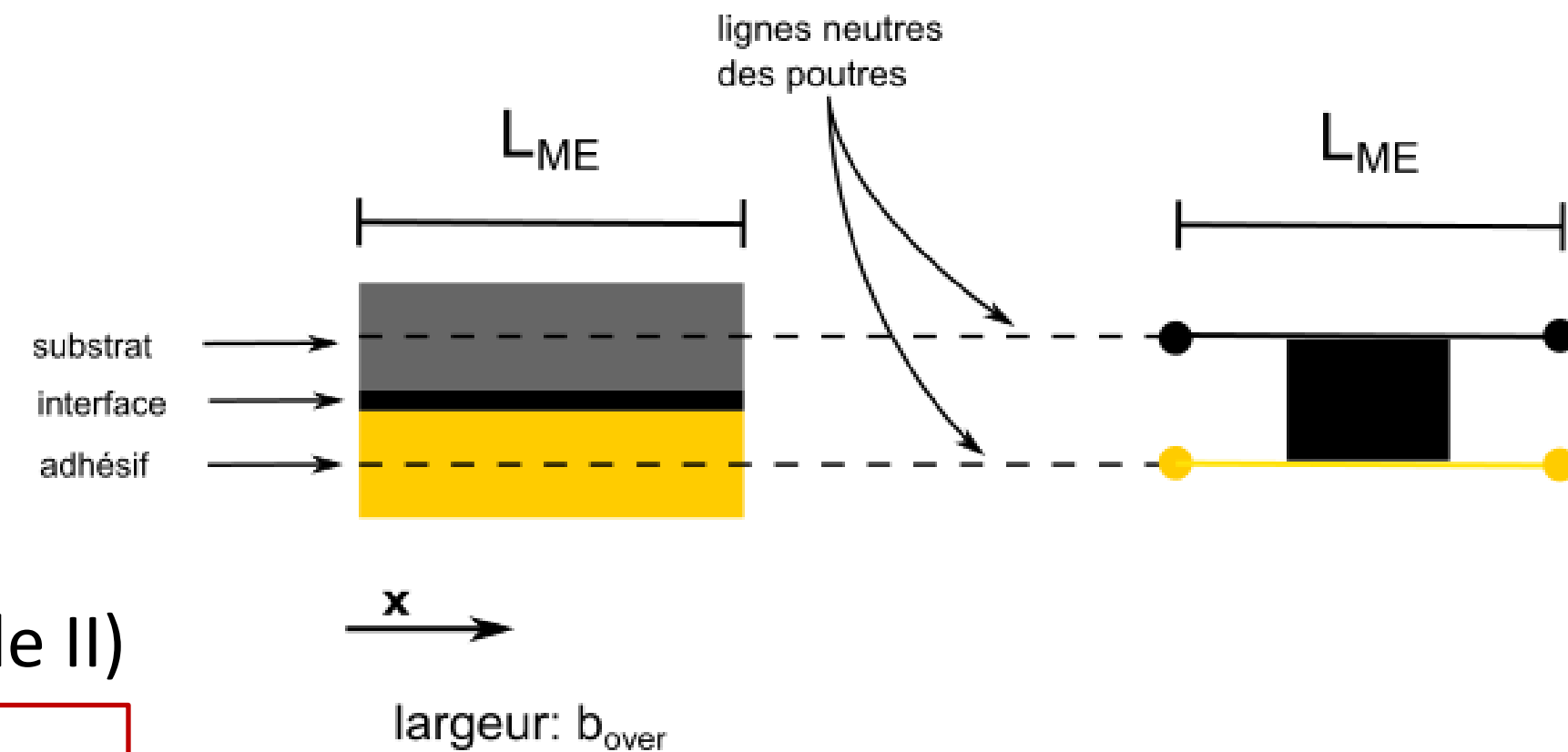


Accès aux détails de la  
répartition des contraintes  
(**Sauvage et al. 2019**)

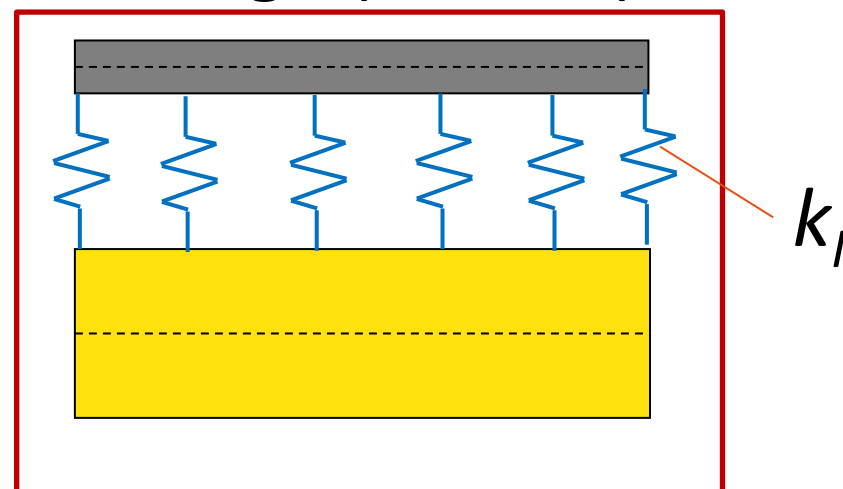
# Représentation de la flexion par la méthode des macro-éléments (ME)

## Utilisation de la méthode ME

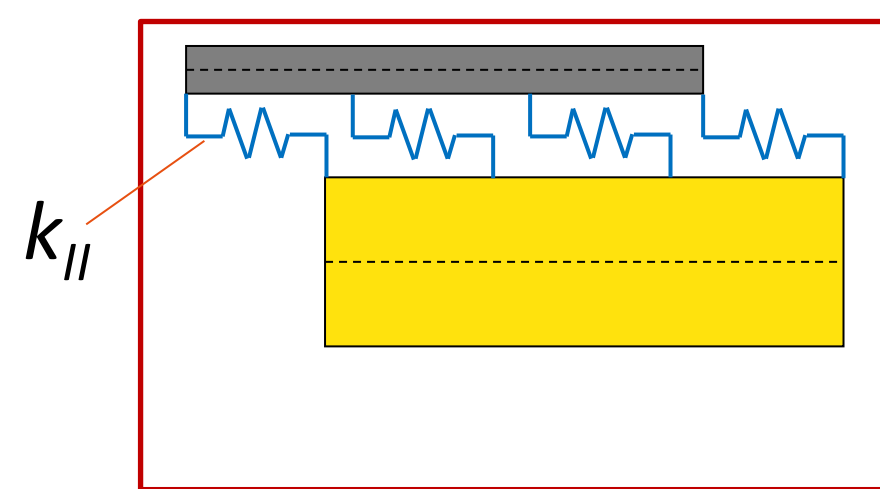
- Approche basée sur interface faible – utilisation d'un lit des ressorts en cisaillement et en pelage



### Pelage (mode I)



### Cisaillement (mode II)



(Goland et Reissner 1944)

$$\sigma = k_I [w_1 - w_2] = k_I \Delta w$$

$$\tau = k_{II} \left[ u_2 - \frac{h_2 \theta_2}{2} - \left( u_1 + \frac{h_1 \theta_1}{2} \right) \right]$$

- Modèle de poutre de Timoshenko pour l'adhésif et le substrat

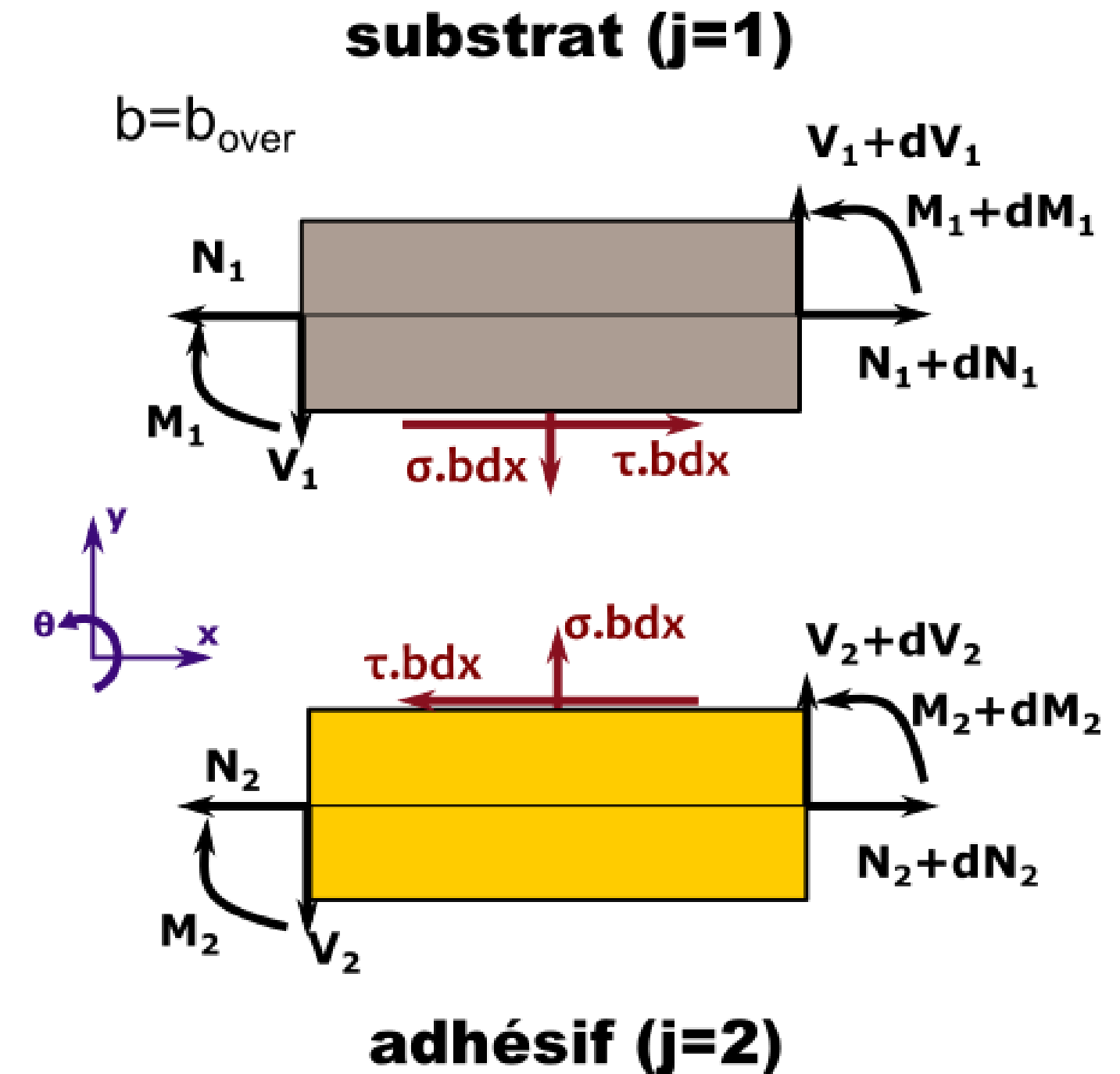


# Représentation de la flexion par la méthode des macro-éléments (ME)

## La brique élémentaire – Matrice de raideur du ME

$$\begin{cases} \frac{dN_j}{dx} = (-1)^j \sigma b_{over} \\ \frac{dV_j}{dx} = (-1)^{j+1} b_{over} \tau \\ \frac{dM_j}{dx} + V_j + \frac{b_{over} h_j \tau}{2} = 0 \end{cases}$$

Équilibre local



# Représentation de la flexion par la méthode des macro-éléments (ME)

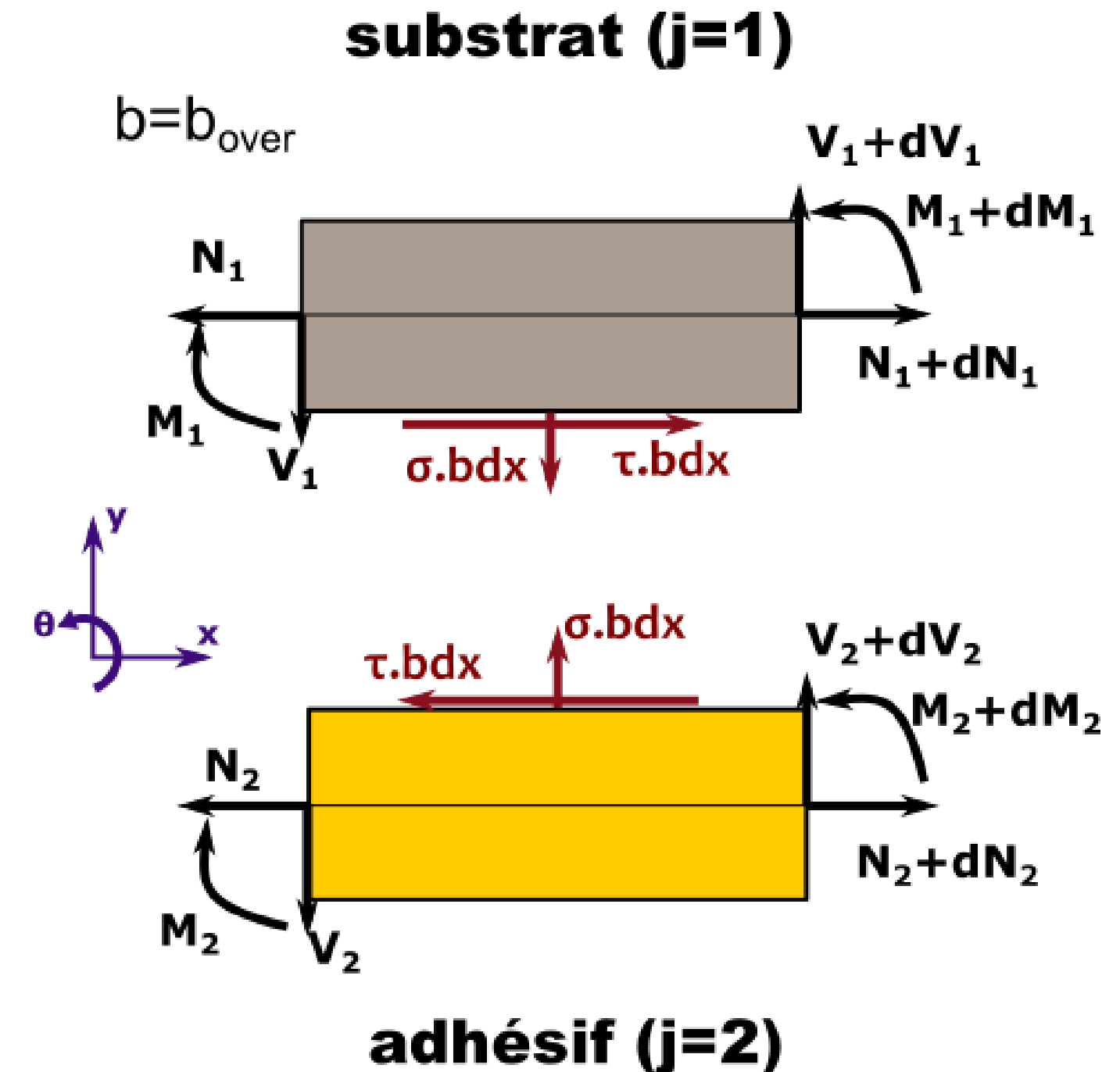
## La brique élémentaire – Matrice de raideur du ME

$$\begin{cases} N_j = A_j \frac{du}{dx} - B_j \frac{d\theta_j}{dx} \\ V_j = H_j \left( \frac{dw_j}{dx} - \theta_j \right) \\ M_j = -B_j \frac{du_j}{dx} + D_j \frac{d\theta_j}{dx} \end{cases}$$

Eq. constitutive  
Timoshenko

$$\begin{cases} \frac{dN_j}{dx} = (-1)^j \sigma b_{over} \\ \frac{dV_j}{dx} = (-1)^{j+1} b_{over} \tau \\ \frac{dM_j}{dx} + V_j + \frac{b_{over} h_j \tau}{2} = 0 \end{cases}$$

Équilibre local



# Représentation de la flexion par la méthode des macro-éléments (ME)

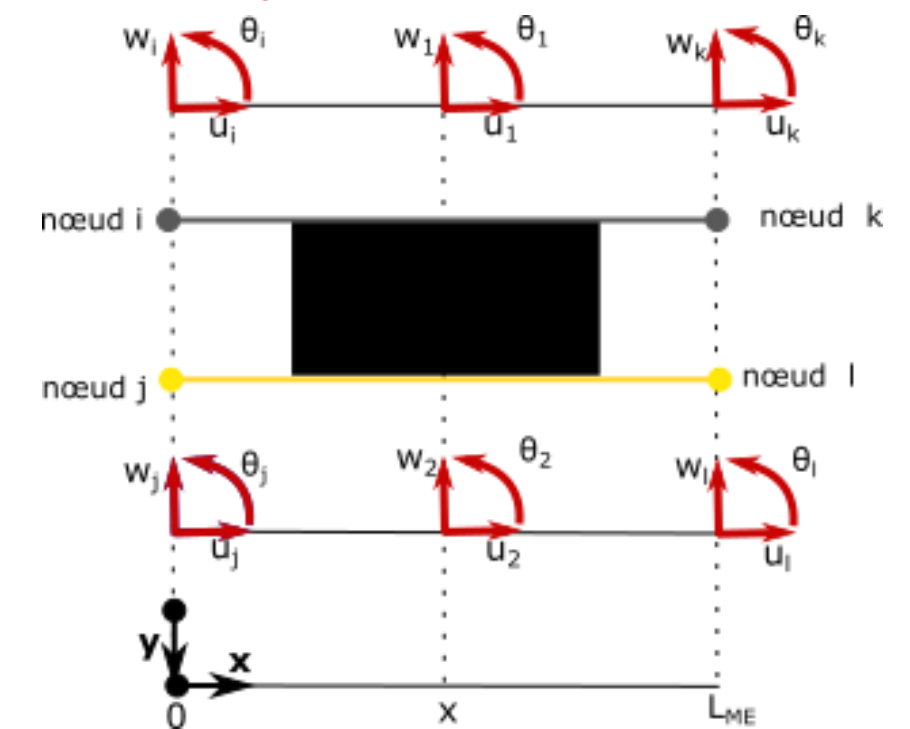
## La brique élémentaire – raideur ME

$$\begin{cases} \frac{dN_j}{dx} = (-1)^j \sigma b_{over} \\ \frac{dV_j}{dx} = (-1)^{j+1} b_{over} \tau \\ \frac{dM_j}{dx} + V_j + \frac{b_{over} h_j \tau}{2} = 0 \end{cases}$$

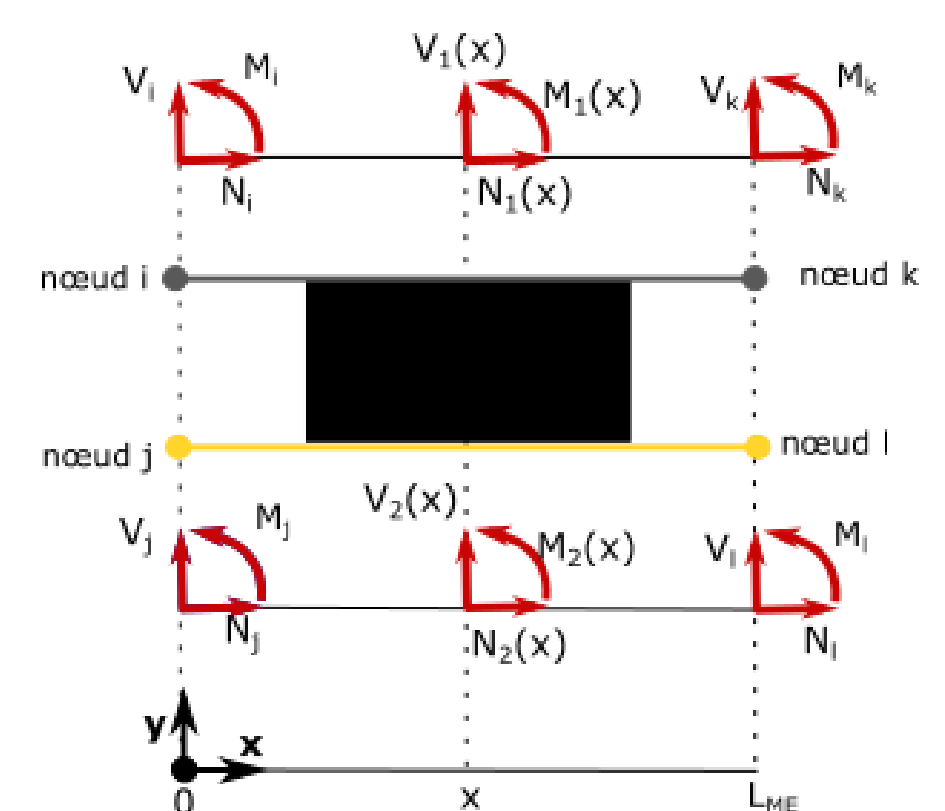
$$\begin{cases} N_j = A_j \frac{du}{dx} - B_j \frac{d\theta_j}{dx} \\ V_j = H_j \left( \frac{dw_j}{dx} - \theta_j \right) \\ M_j = -B_j \frac{du_j}{dx} + D_j \frac{d\theta_j}{dx} \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} -N_1(0) \\ -N_2(0) \\ N_1(L_{ME}) \\ N_2(L_{ME}) \\ -V_1(0) \\ -V_2(0) \\ V_1(L_{ME}) \\ V_2(L_{ME}) \\ -M_1(0) \\ -M_2(0) \\ M_1(L_{ME}) \\ M_2(L_{ME}) \end{pmatrix} = \boxed{K_e} \begin{pmatrix} u_1(0) \\ u_2(0) \\ u_1(L_{ME}) \\ u_2(L_{ME}) \\ w_1(0) \\ w_2(0) \\ w_1(L_{ME}) \\ w_2(L_{ME}) \\ \theta_1(0) \\ \theta_2(0) \\ \theta_1(L_{ME}) \\ \theta_2(L_{ME}) \end{pmatrix}$$

### Déplacements nodaux



### Efforts nodaux



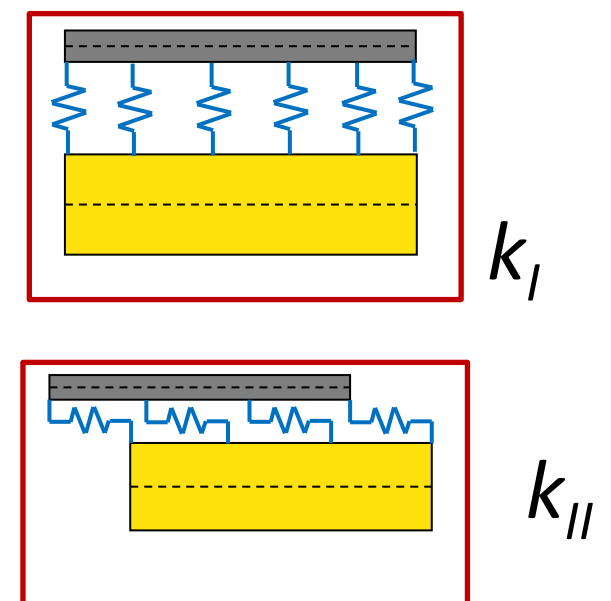
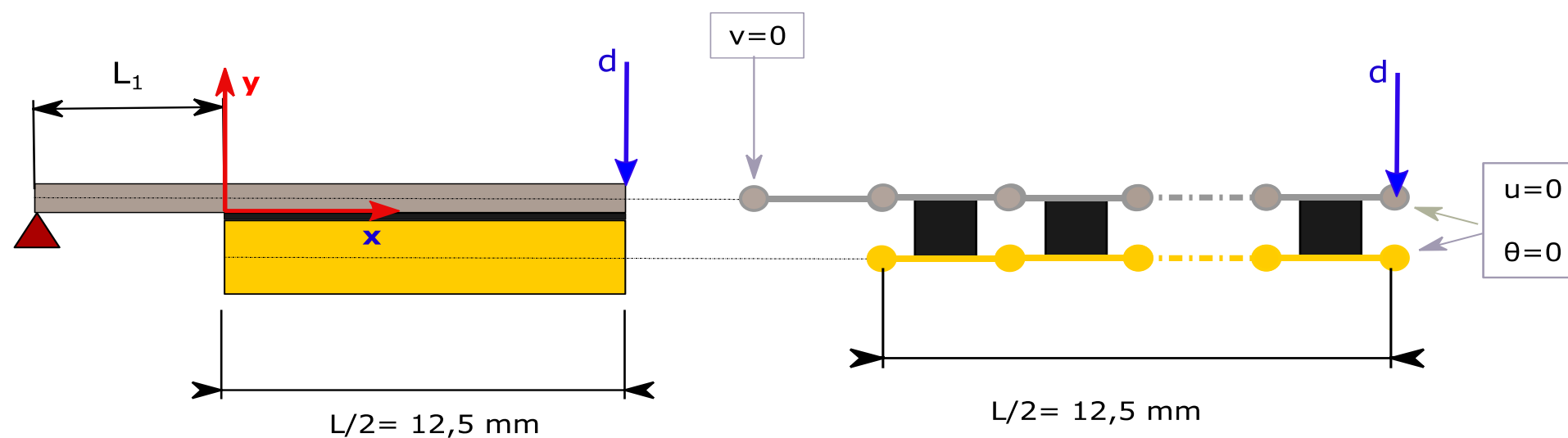
(Paroissien et al. 2013)

Soutenance de thèse – VASCONCELLOS BIRRO Thiago

# Étape 1 – Calage de la raideur interfaciale

**Démarche** : calage des paramètres géométriques à partir des pentes **avant** l'amorçage ( $K_{over}$ ) et **après** la propagation ( $K_{subs}$ )

- Raideur de l'interface:  $k_i$ ,  $k_{ii}$
- Vérification de la longueur hors recouvrement  $L_1$

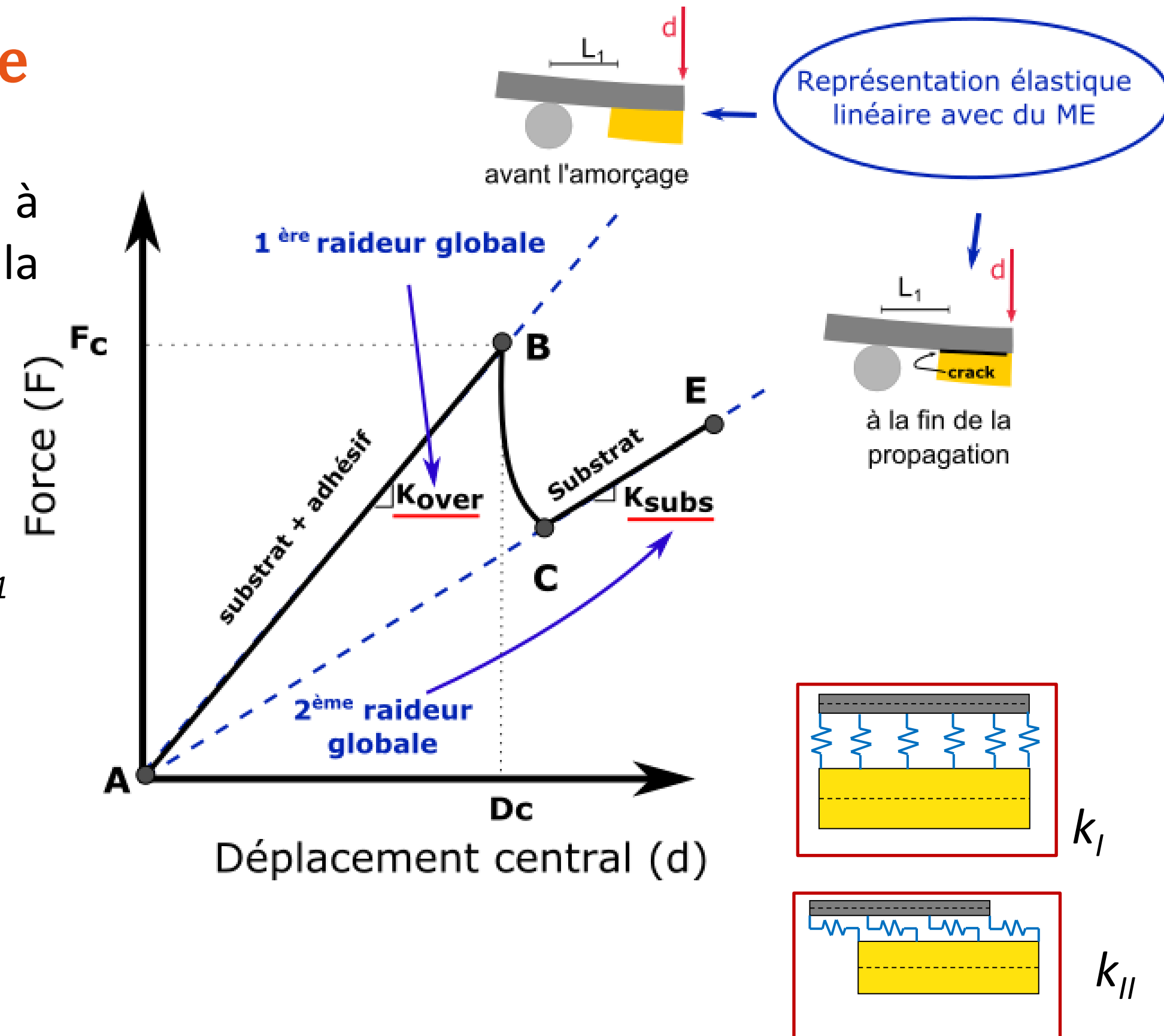




# Étape 1 – Calage de la raideur interfaciale

**Démarche** : calage des paramètres géométriques à partir des pentes **avant** l'amorçage ( $K_{over}$ ) et **après** la propagation ( $K_{subs}$ )

- Raideur de l'interface:  $k_I$ ,  $k_{II}$
- Vérification de la longueur hors recouvrement  $L_1$



## Étape 2 – Détermination de la contrainte critique

Quelles sont les propriétés qui en résultent pour un amorçage à  $F_c$  et  $S_c$  ?

*Utilisation du critère couplé contrainte-énergie*

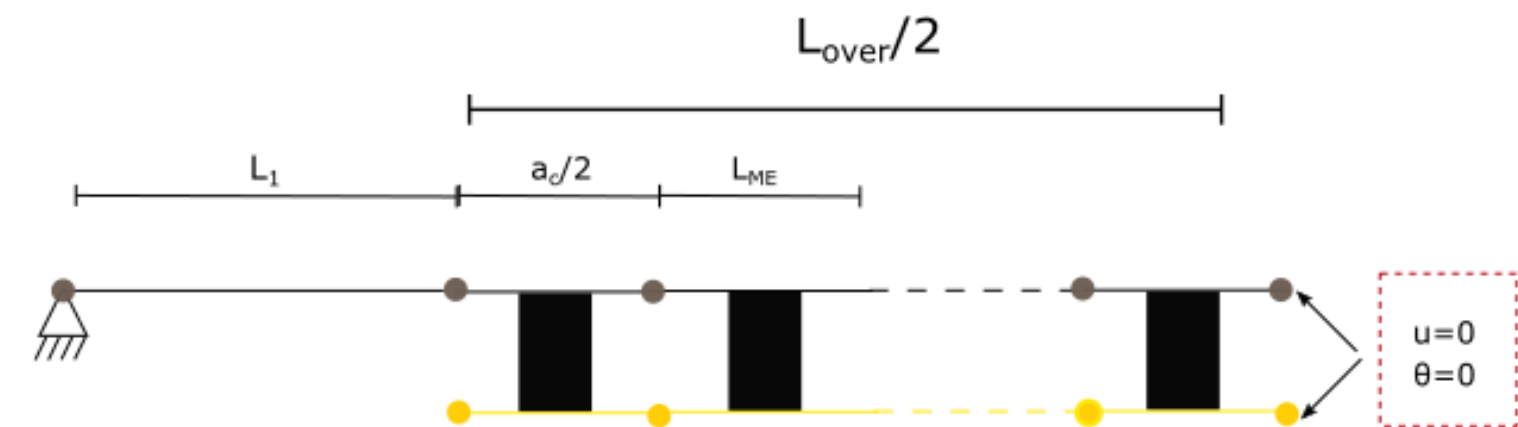
*Critère de contrainte*

norme euclidienne

$$\sigma_{eq}(x) = \sqrt{\sigma^2(x) + \tau^2(x)} \geq \sigma_c$$



Représentation par ME - symétrie



Éprouvette non-fissurée

# Étape 3 – Détermination de la ténacité critique

Quelles sont les propriétés qui en résultent dans un amorçage à  $F_c$  et  $S_c$  ?

*Utilisation du critère couplé contrainte-énergie*

**Critère d'énergie**

*Critère d'énergie différentielle ( $dS$ )*

$$G_{dif} = - \frac{dW}{dS}$$



*Critère d'énergie incrémentale ( $\Delta S$ )*

$$G_{inc} = - \frac{\Delta W}{\Delta S}$$

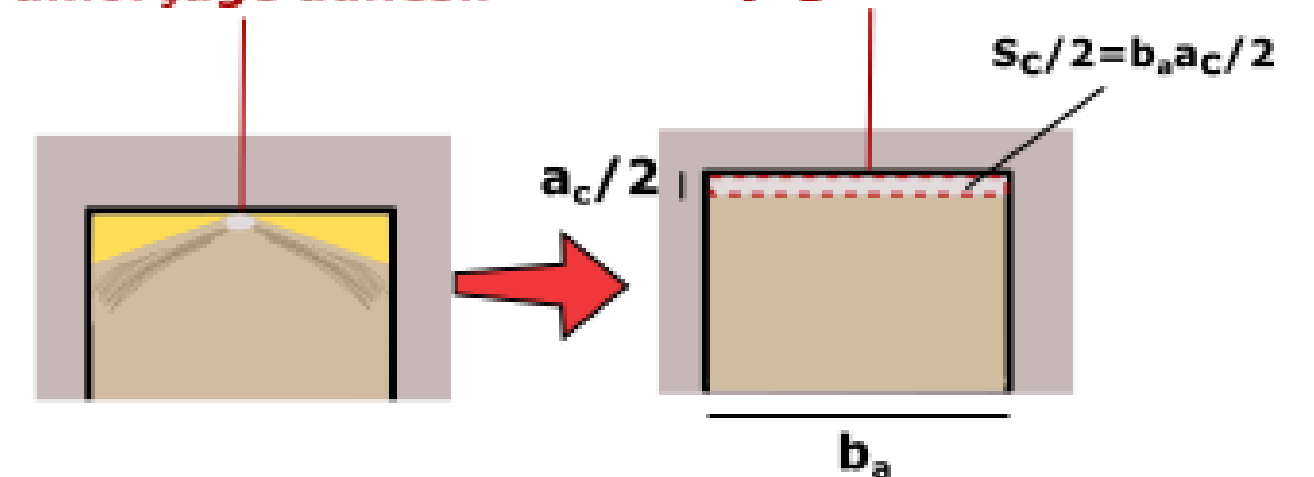
**Fissure 1D et 2D - approche**

Petit rond ( $S_c$ )

longueur de fissure  
adoptée ( $a_c/2$ )

**amorçage adhésif**

**amorçage considéré**



## Étape 3 – Détermination de la ténacité critique

Quelles sont les propriétés qui en résultent pour un amorçage à  $F_c$  et  $S_c$  ?

*Utilisation du critère couplé contrainte-énergie*

*Critère d'énergie*

*Critère d'énergie différentielle ( $dS$ )*

$$\mathcal{G}_{dif} = -\frac{dW}{dS}$$

*Critère d'énergie incrémentale ( $\Delta S$ )*

$$\mathcal{G}_{inc} = -\frac{\Delta W}{\Delta S}$$



$$\mathcal{G}_{inc} = \frac{1}{\Delta S} \int_0^S \mathcal{G}_{dif}(\Omega) d\Omega$$



# Étape 3 – Détermination de la ténacité critique

Quelles sont les propriétés qui en résultent pour un amorçage à  $F_c$  et  $S_c$  ?

*Utilisation du critère couplé contrainte-énergie*

*Critère d'énergie*

Détermination d'énergie:

- Intégrale- J (différentielle) – **Fraisse et Schmit (1994)**

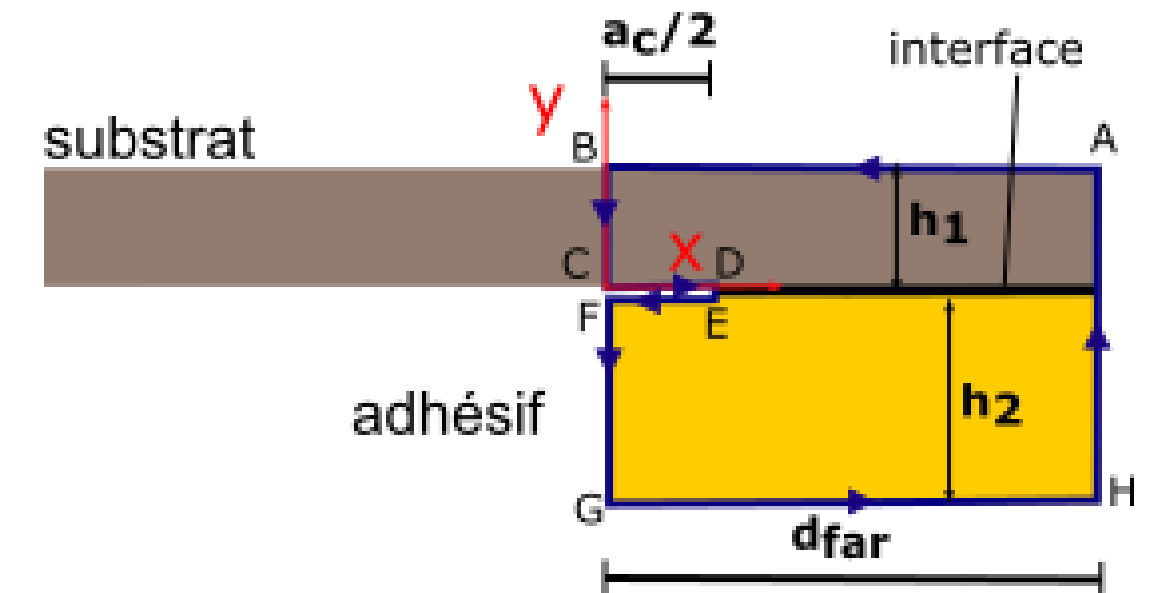
$$\mathcal{G}_{dif} = \int \Pi dy - \mathbf{T} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} ds, \mathbf{T} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}$$

- Puis, transformation en énergie incrémentale (valeur finie)

$$\mathcal{G}_{inc} = \frac{1}{\Delta S} \int_0^S \mathcal{G}_{dif}(\Omega) d\Omega$$

- Énergie post-traitée directement (**Martin et. al 2016**)

$$\mathcal{G}_{inc} = -\frac{\Delta W}{\Delta S}$$



## Étape 3 – Détermination de la ténacité critique

Quelles sont les propriétés qui en résultent pour un amorçage à  $F_c$  et  $S_c$  ?

*Utilisation du critère couplé contrainte-énergie*

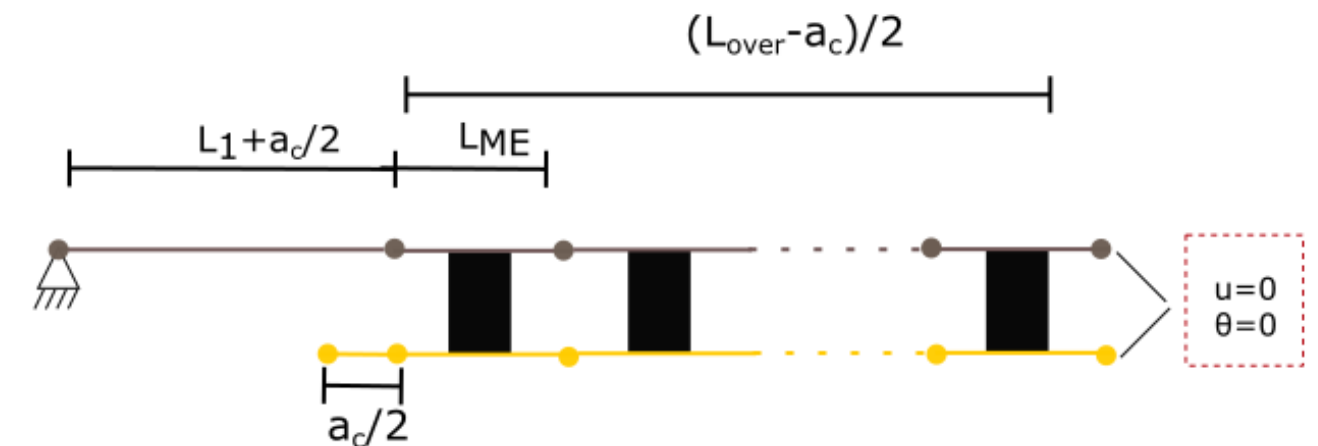
*Critère d'énergie*

*Critère d'énergie incrémentale ( $\Delta S$ )*

$$G_{inc} \geq G_c$$



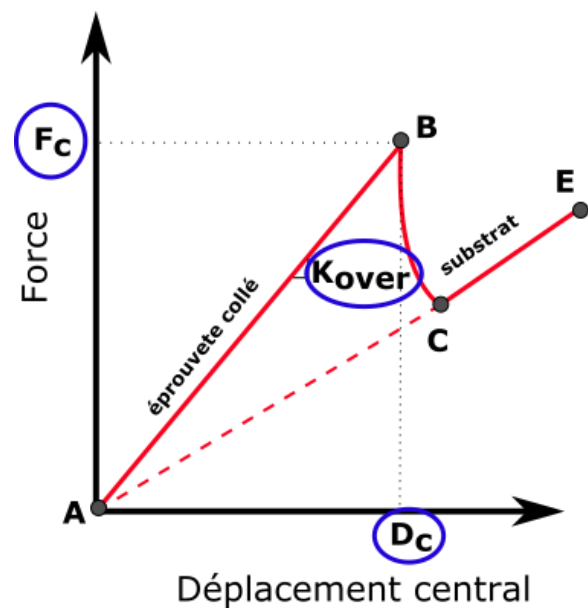
Représentation par ME - symétrie



*Éprouvette fissurée*

# Algorithme CC calculé par ME

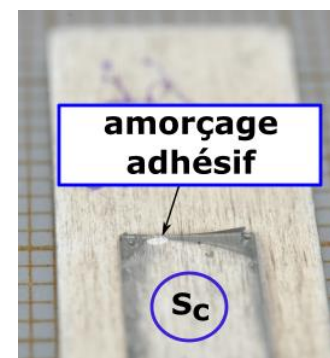
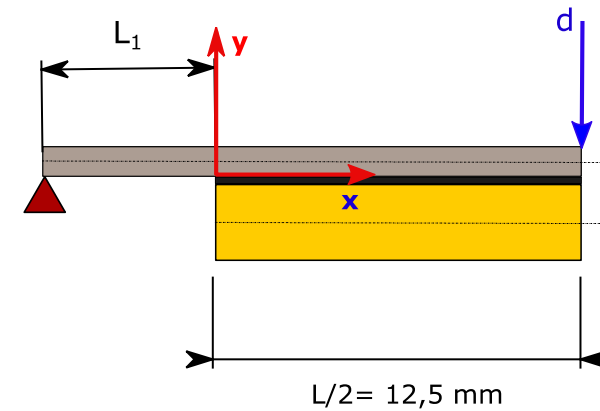
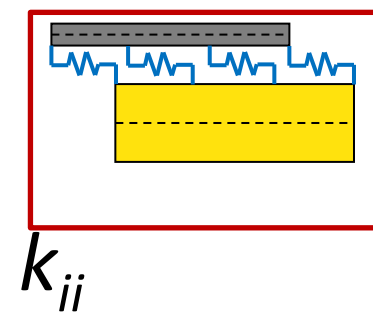
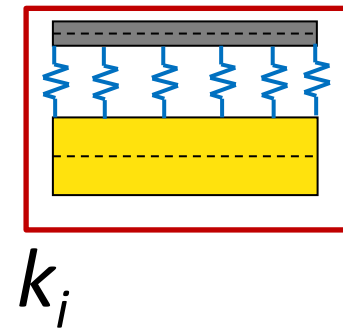
Données  
expérimentales



Étape 1

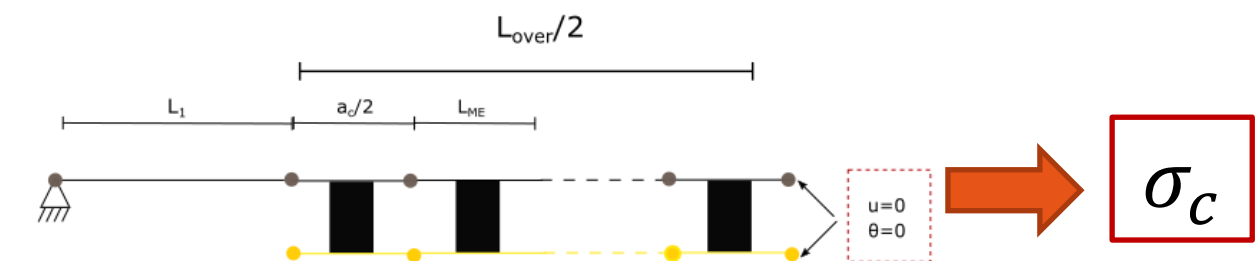
Calage de  
paramètres

$L_1, k_i, k_{ij}$



Étape 2

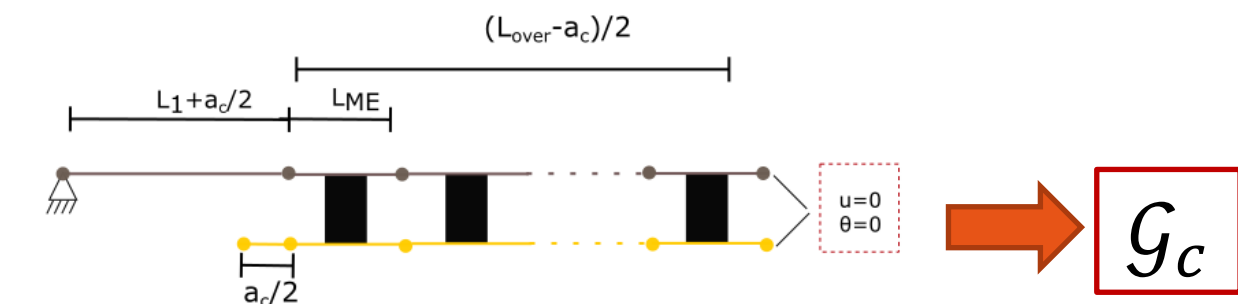
Critère de  
contrainte



Éprouvette non-fissurée

Étape 3

Critère d'énergie

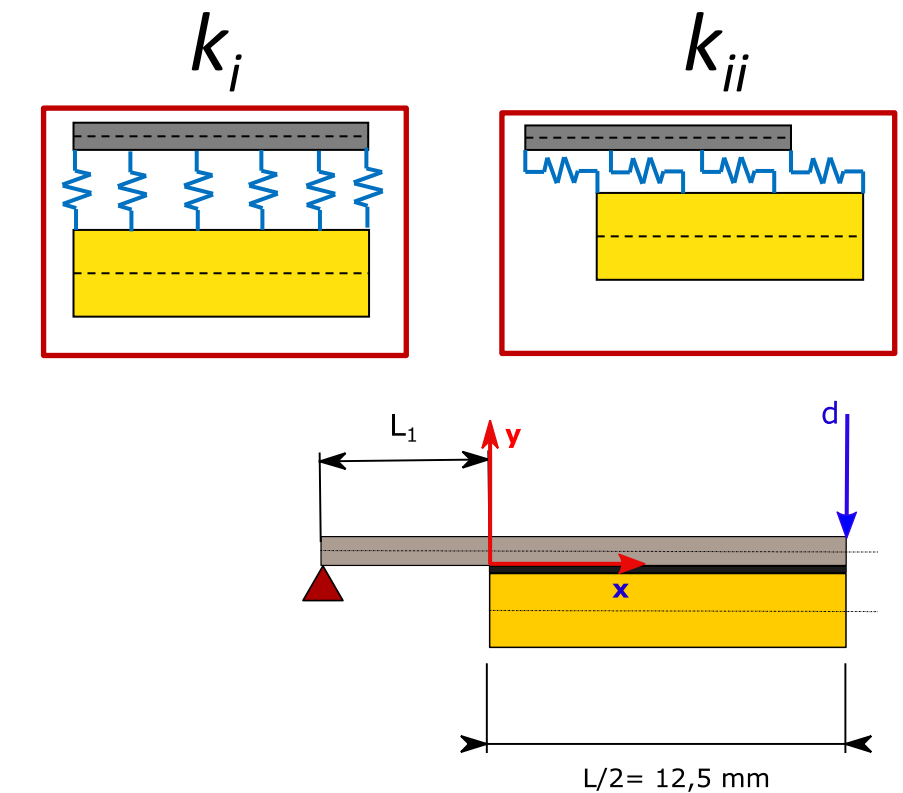
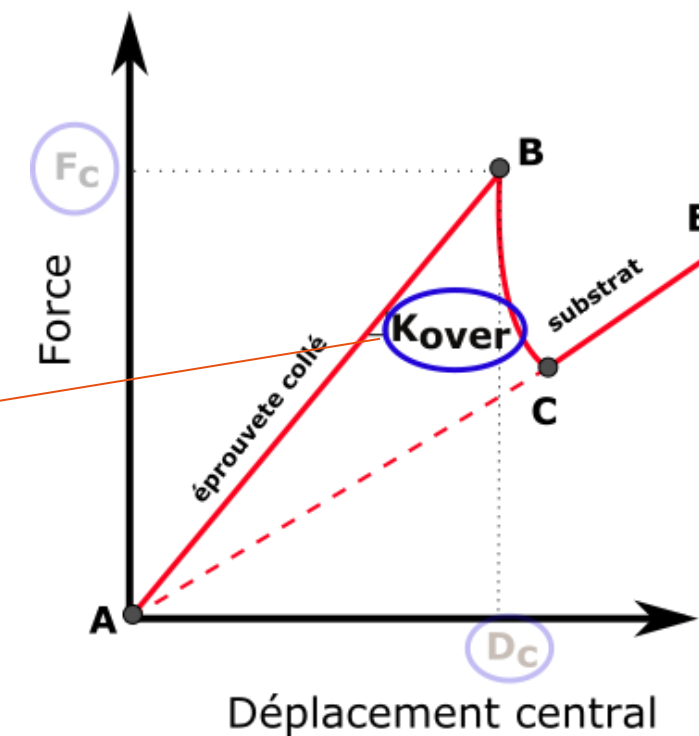
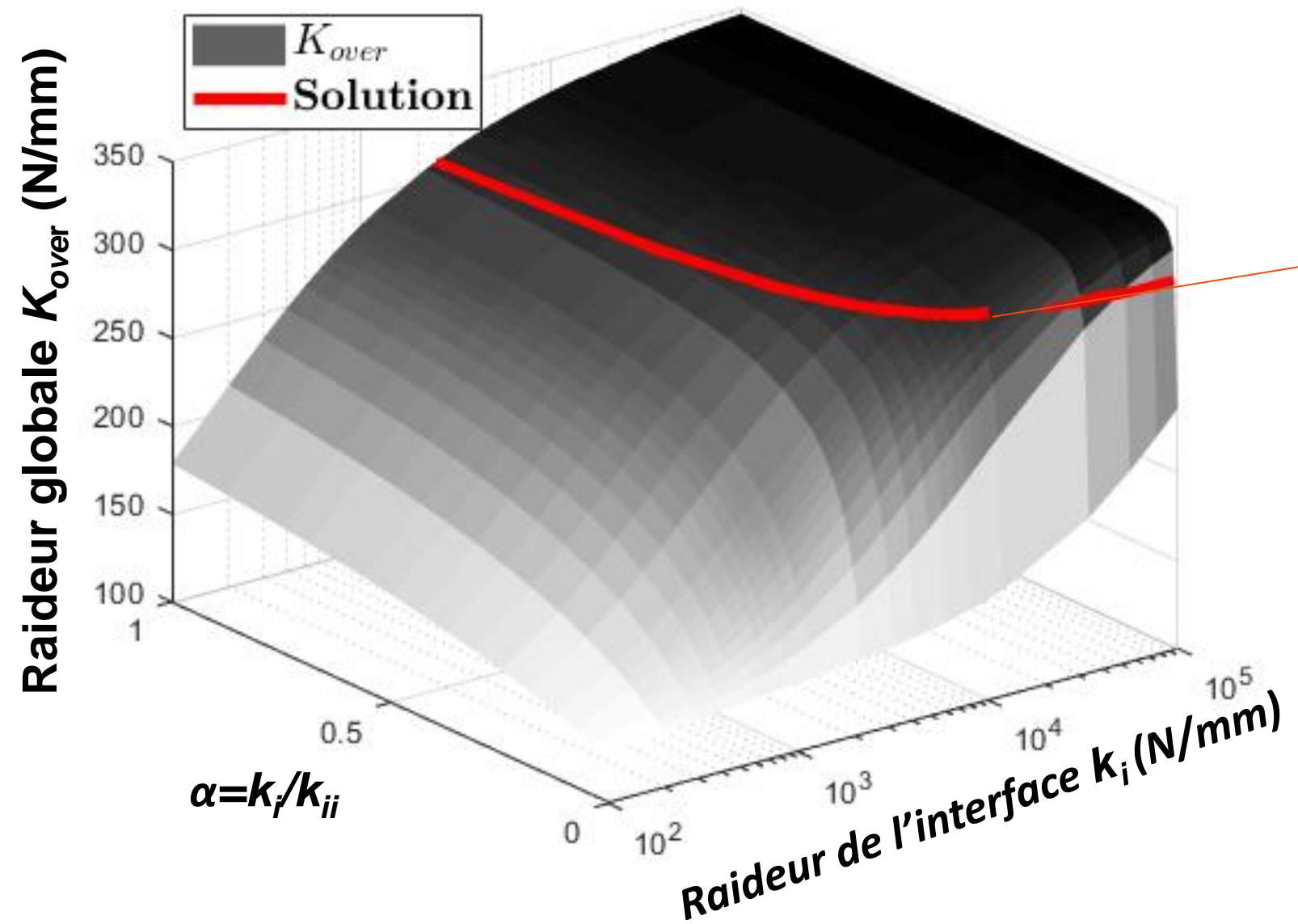


Éprouvette fissurée

# Mise en oeuvre - Calage de raideur de l'interface – Étape 1

Une étude est menée pour une série avec l'épaisseur  $h_s = 1,08 \text{ mm}$

- Raideur globale de l'éprouvette ( $K_{over} = 309 \text{ N/mm}$ )



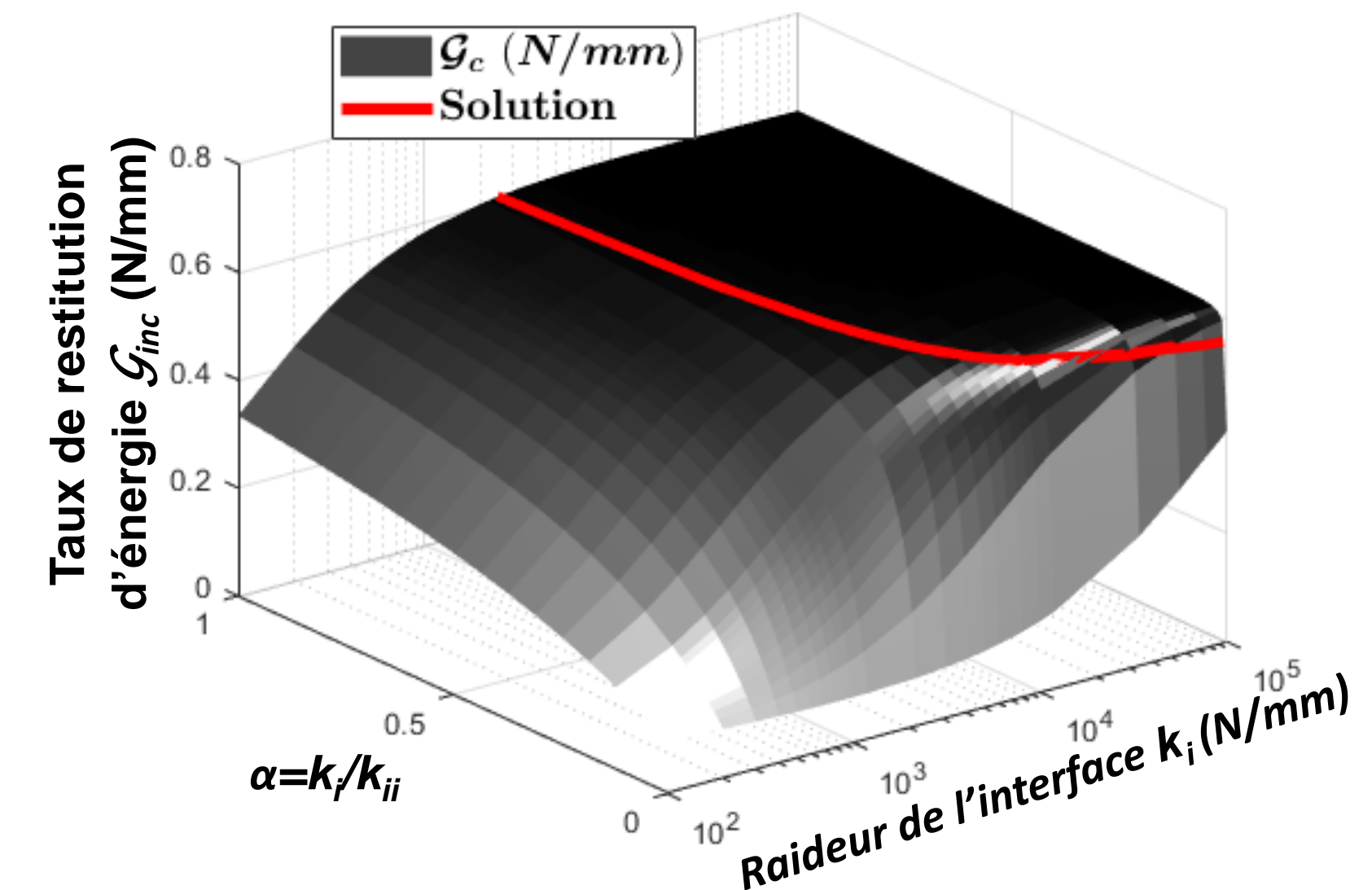
- Quel couple ( $k_i$  et  $k_{ii}$ ) de raideur faut-il considérer ? (Soit  $\alpha = k_i / k_{ii}$ )
- Distance entre appui et plot adhésif :  $L_1 = 5,45 \text{ mm}$
- **Comment accéder à ces paramètres ?**



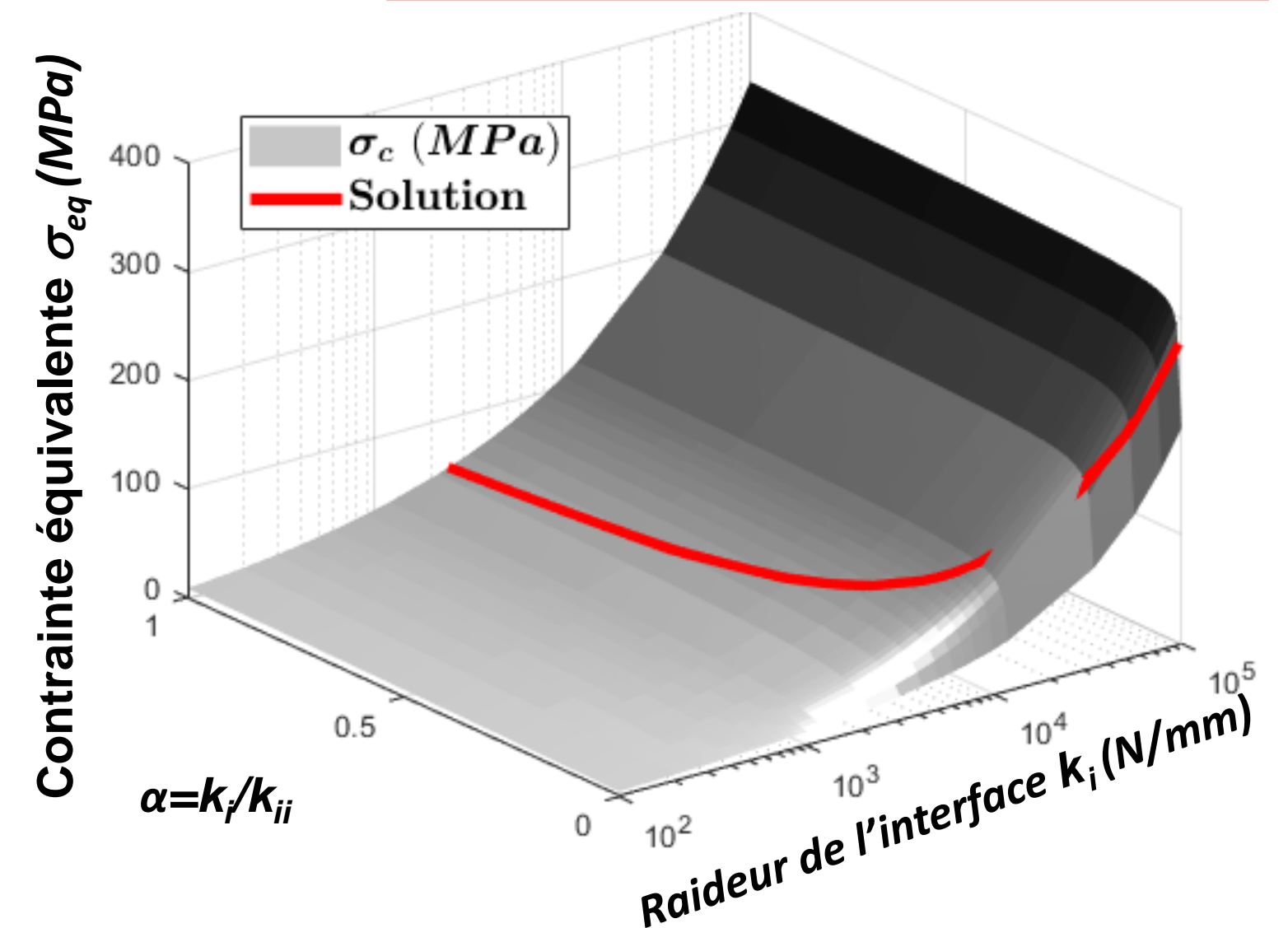
# Mise en oeuvre - Propriétés mécaniques - Étape 2 et 3

Influence de  $k_i$  et  $k_{ij}$  sur les propriétés lors de l'amorçage de fissure

Taux de restitution d'énergie



Contrainte équivalente



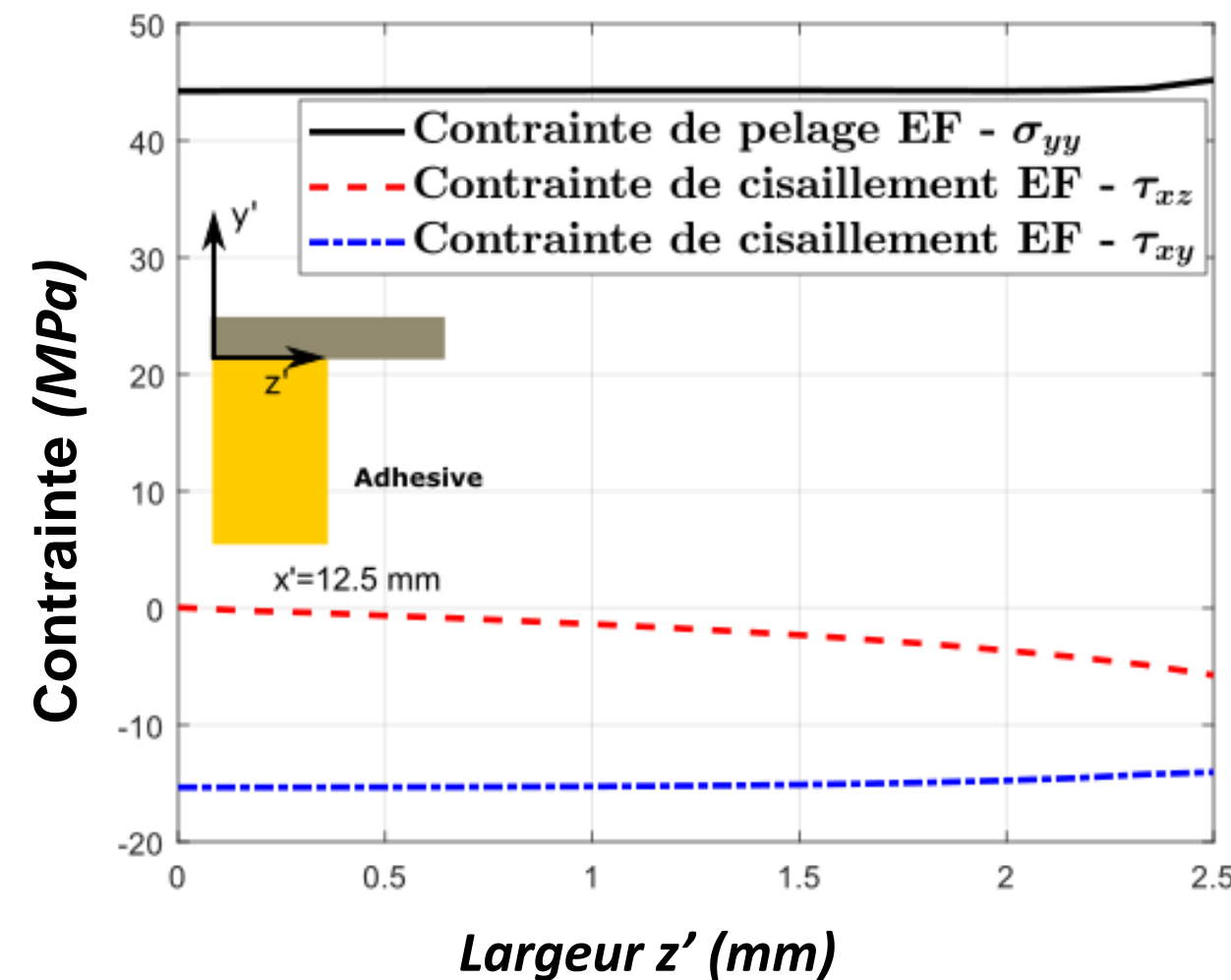
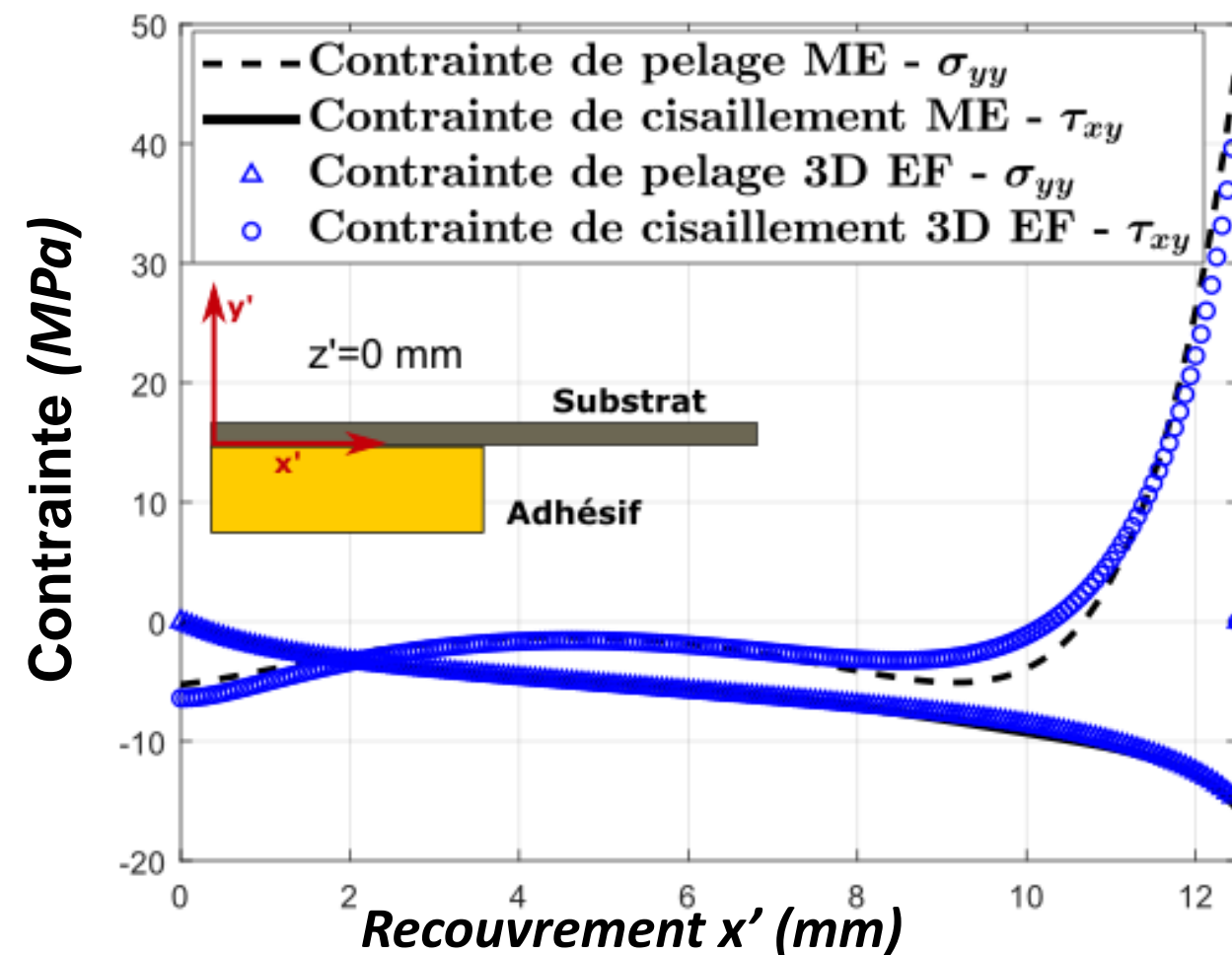
# Comparaison du ME (1D) et EF (3D) - Cas conservatif – $k_i=k_{ii}$

- EF (3D) avec des **éléments d'interface**
- Hypothèses similaires à **Golaz et al. (2013)** et **Martin et al. (2016)**

$$k_i=k_{ii}=k_{iii}=2000 \text{ MPa/mm}$$

EF (3D – élément d'interface) et 1D - ME

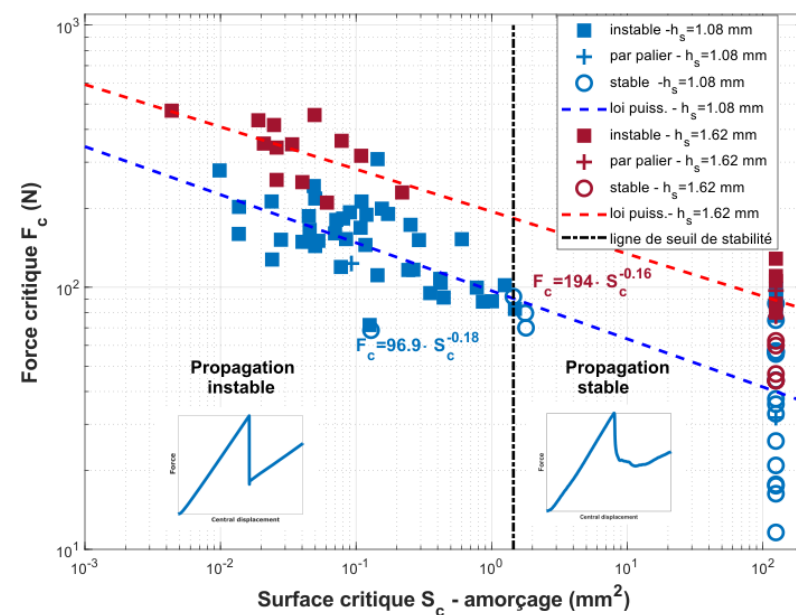
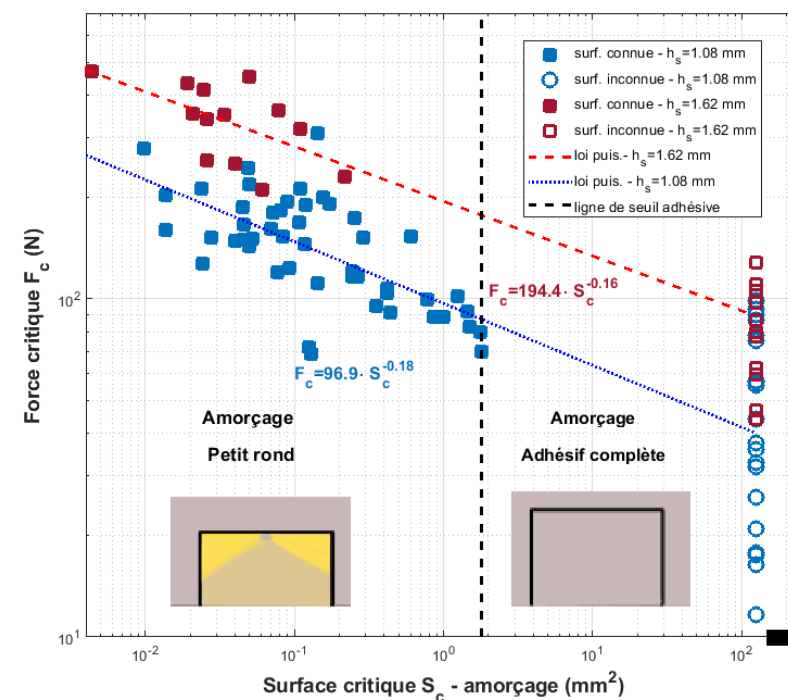
Contrainte le long du recouvrement



Mode I qui pilote  
l'amorçage  
(au bord)

# Résultats numériques : contrainte et énergie

Données  
expérimentales

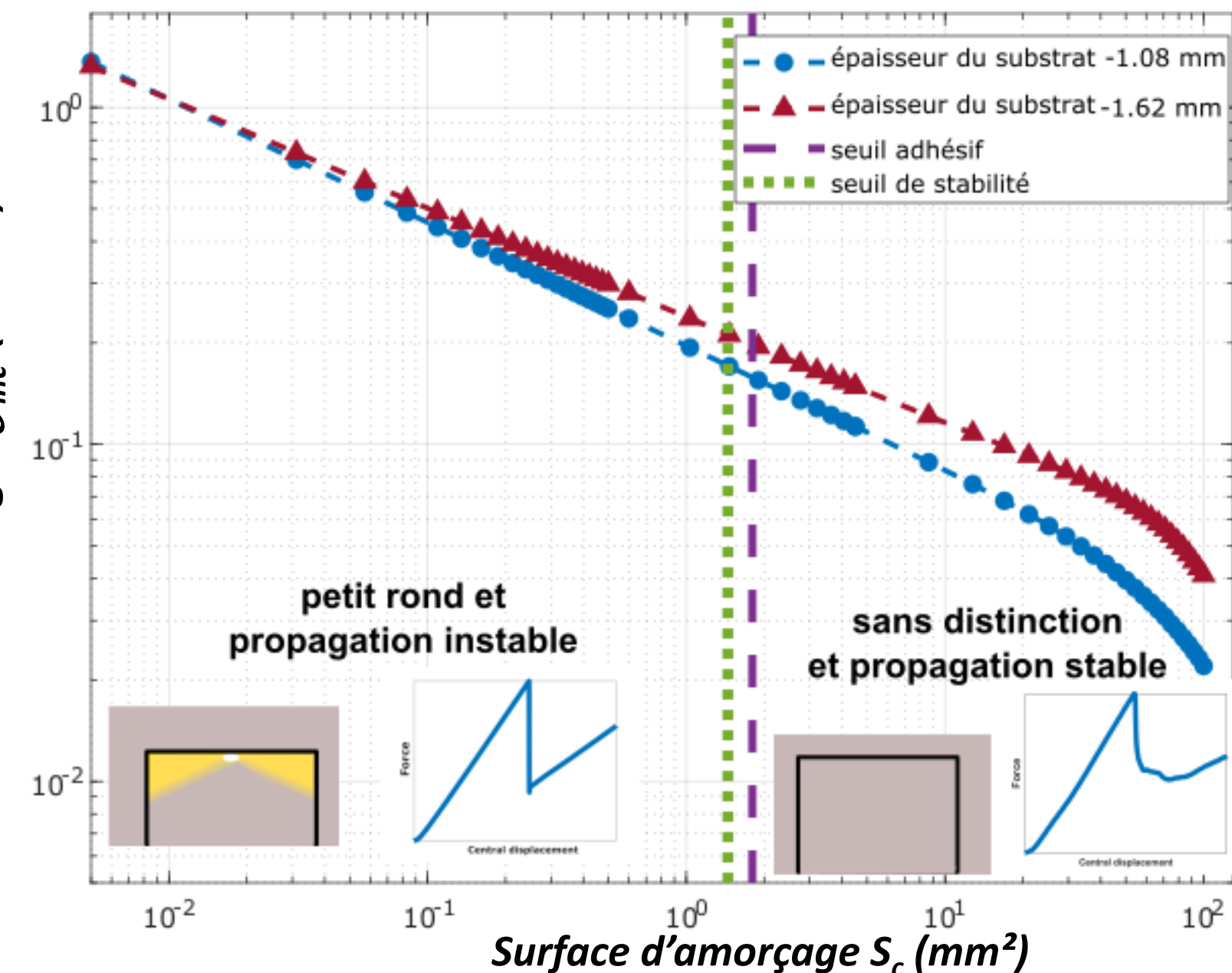


Algorithme

Taux de restitution  
d'énergie  $\mathcal{G}_{inc}$  (N/mm)

Propriétés de  
l'interface

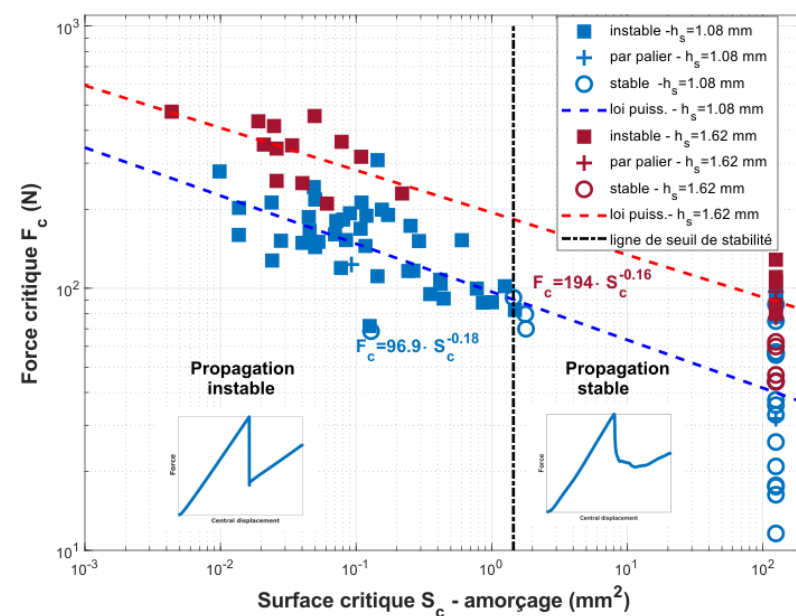
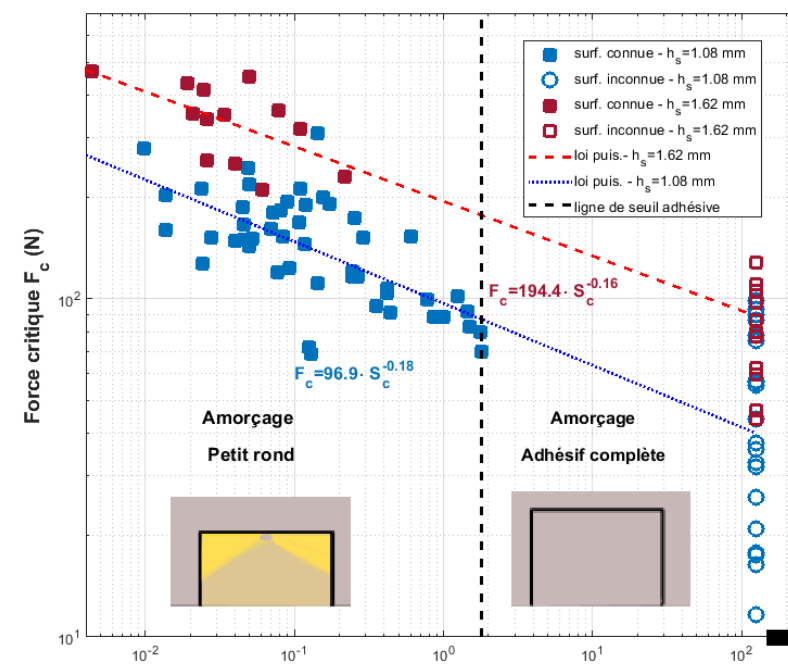
Ténacité de l'interface





# Résultats numériques : contrainte et énergie

Données  
expérimentales

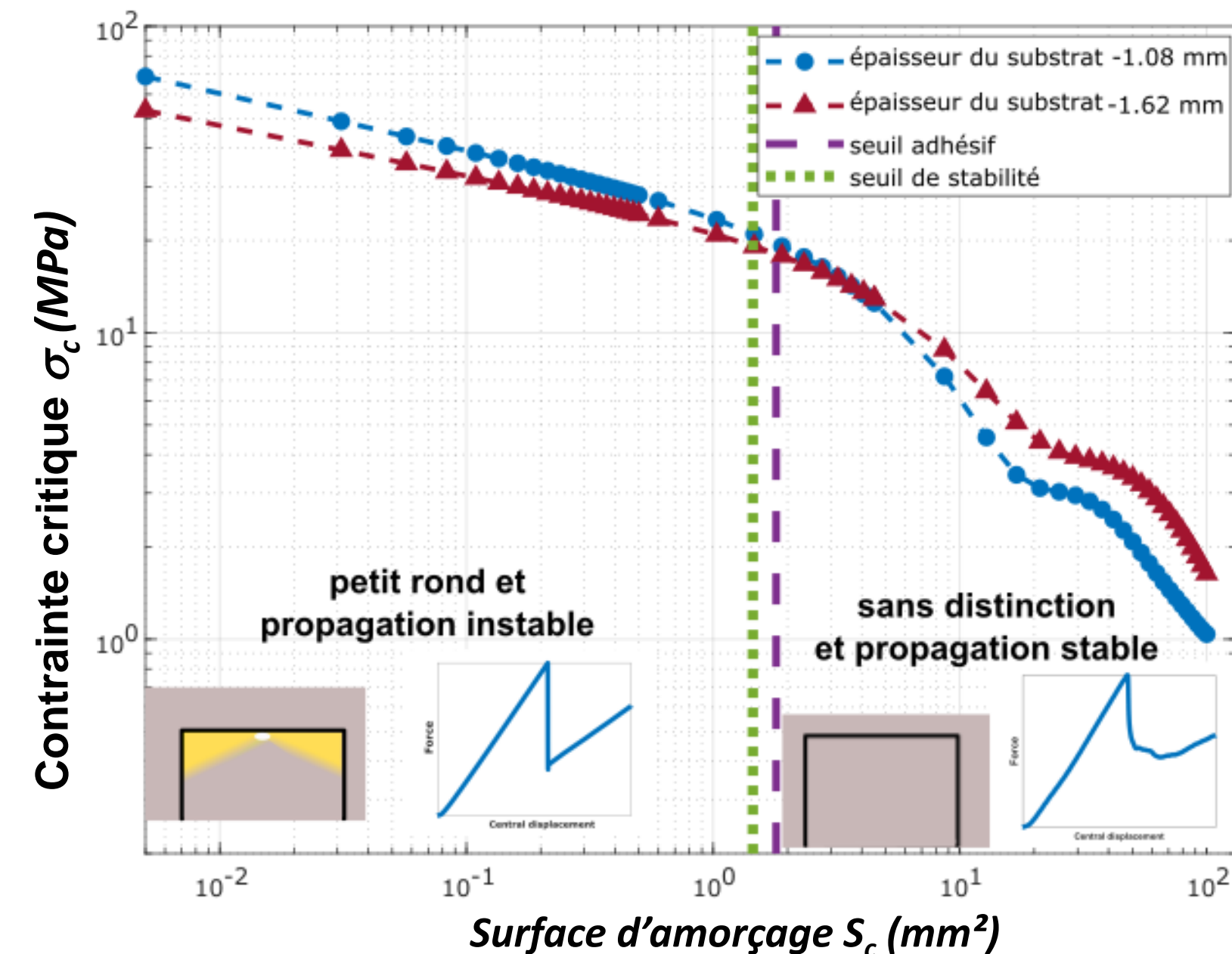


Algorithme

Prédiction de la rupture lors de  
l'identification de l'amorçage

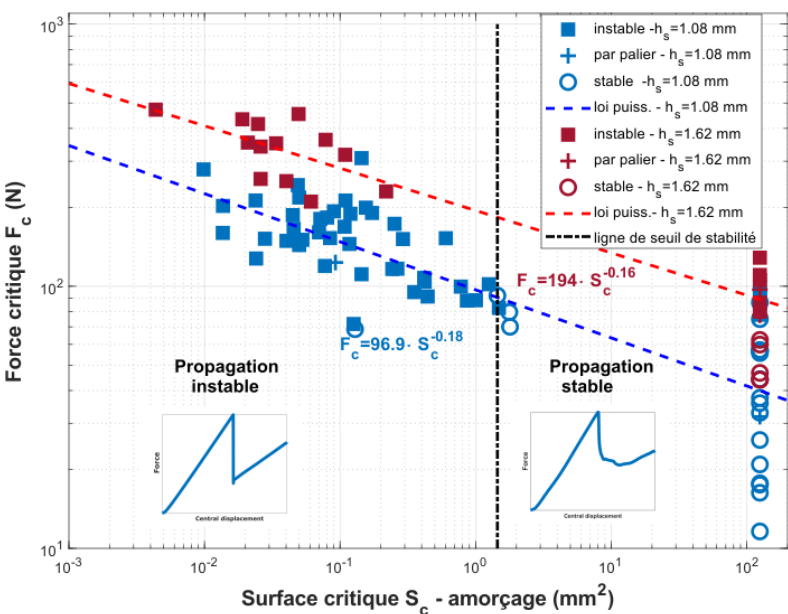
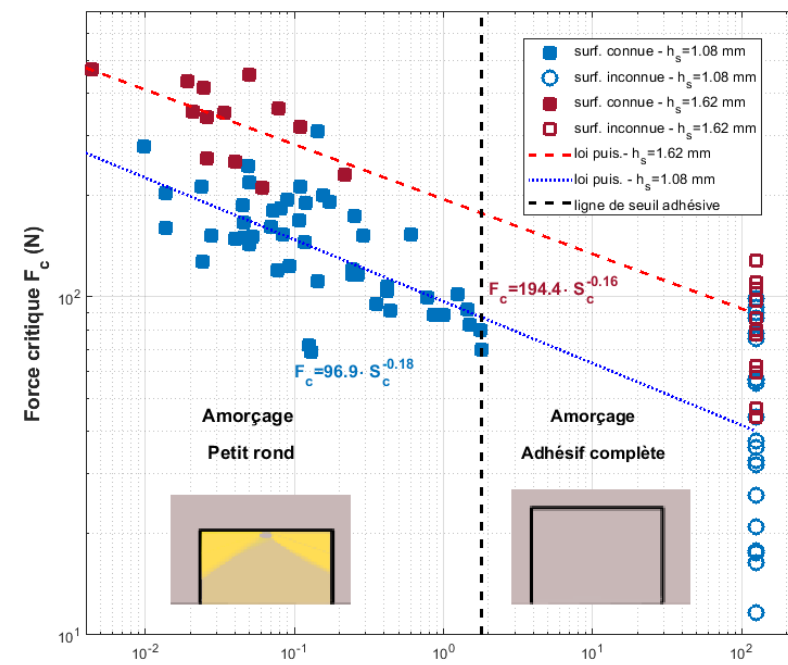
Propriétés de  
l'interface

Contrainte critique



# Résultats numériques : contrainte et énergie

Données  
expérimentales



Rupture  
adhésive

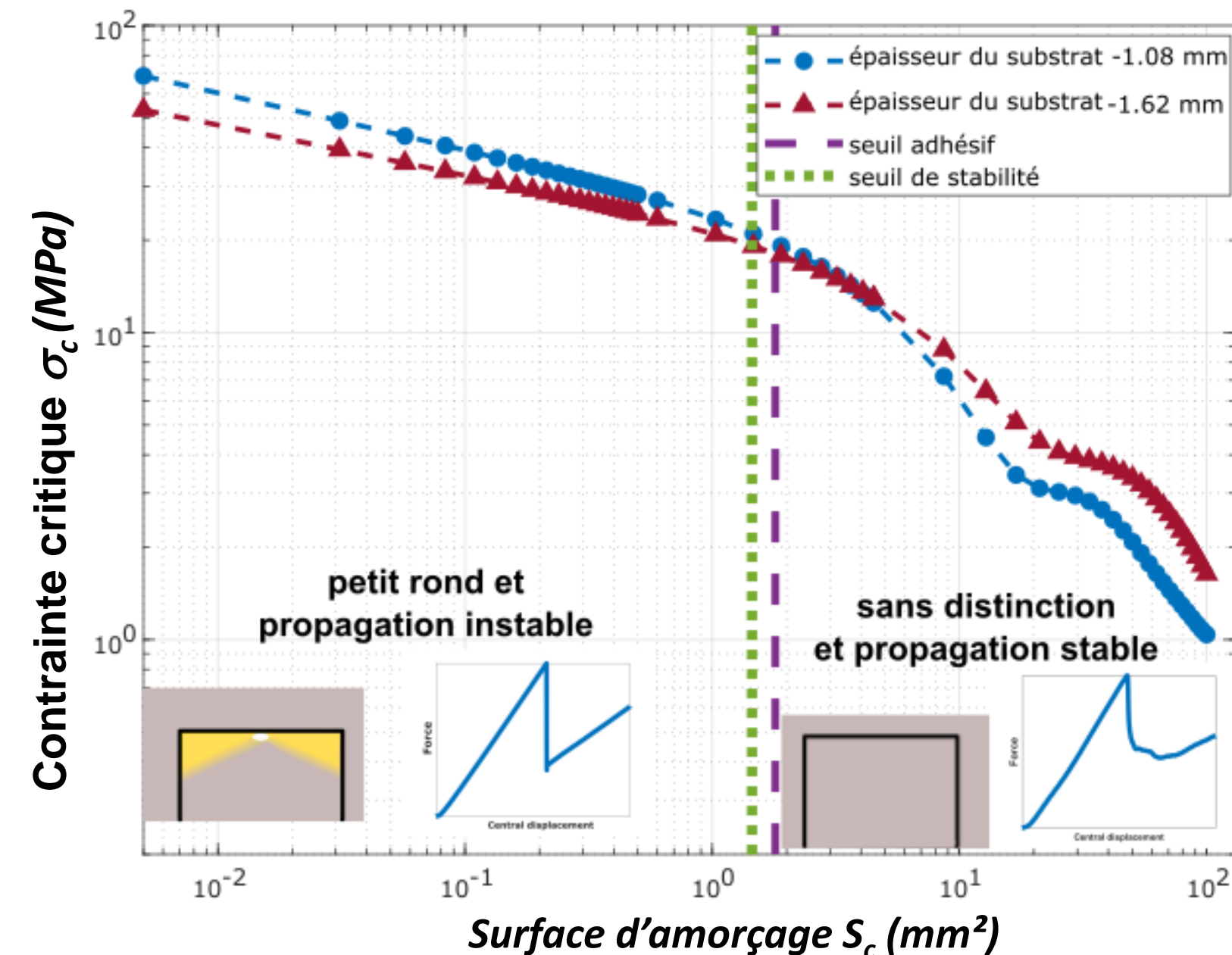


Algorithme

Prédiction de la rupture lors de  
l'identification de l'amorçage

Propriétés de  
l'interface

Contrainte critique





# Application des résultats : endommagement de l'interface

Comment l'exploiter ? – loi d'endommagement de l'interface (CZM)

- Utilisation d'une loi de séparation bilinéaire (la même interface avec une autre géométrie)
  - Implémenté sous plusieurs logiciels



Propriétés prévues pour  $h_s=1,08\text{mm}$

$$\begin{aligned} G_c &= 0,609 \text{ N/mm} \\ \sigma_c &= 48,9 \text{ MPa} \\ k_I &= 2000 \text{ MPa/mm} \end{aligned}$$

Loi bilinéaire avec  
le ME

Amorçage adhésive ( $F_c$ ) en considérant  
 $h_s=1,62 \text{ mm}$

Rupture adhésive

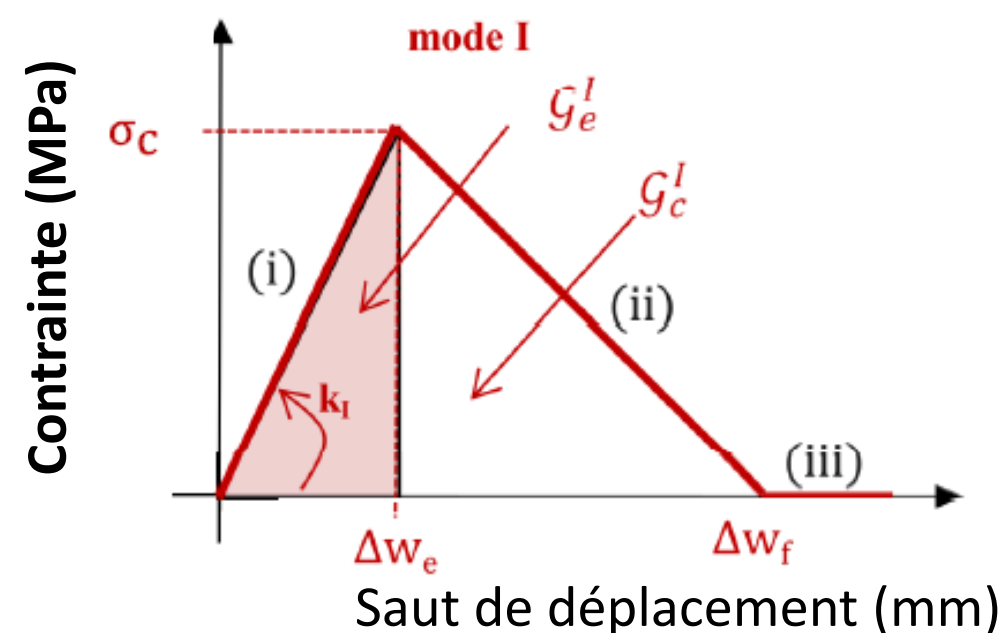
Sans différentiation de modes

$$G_{Ic} = G_{IIc} = G_c$$

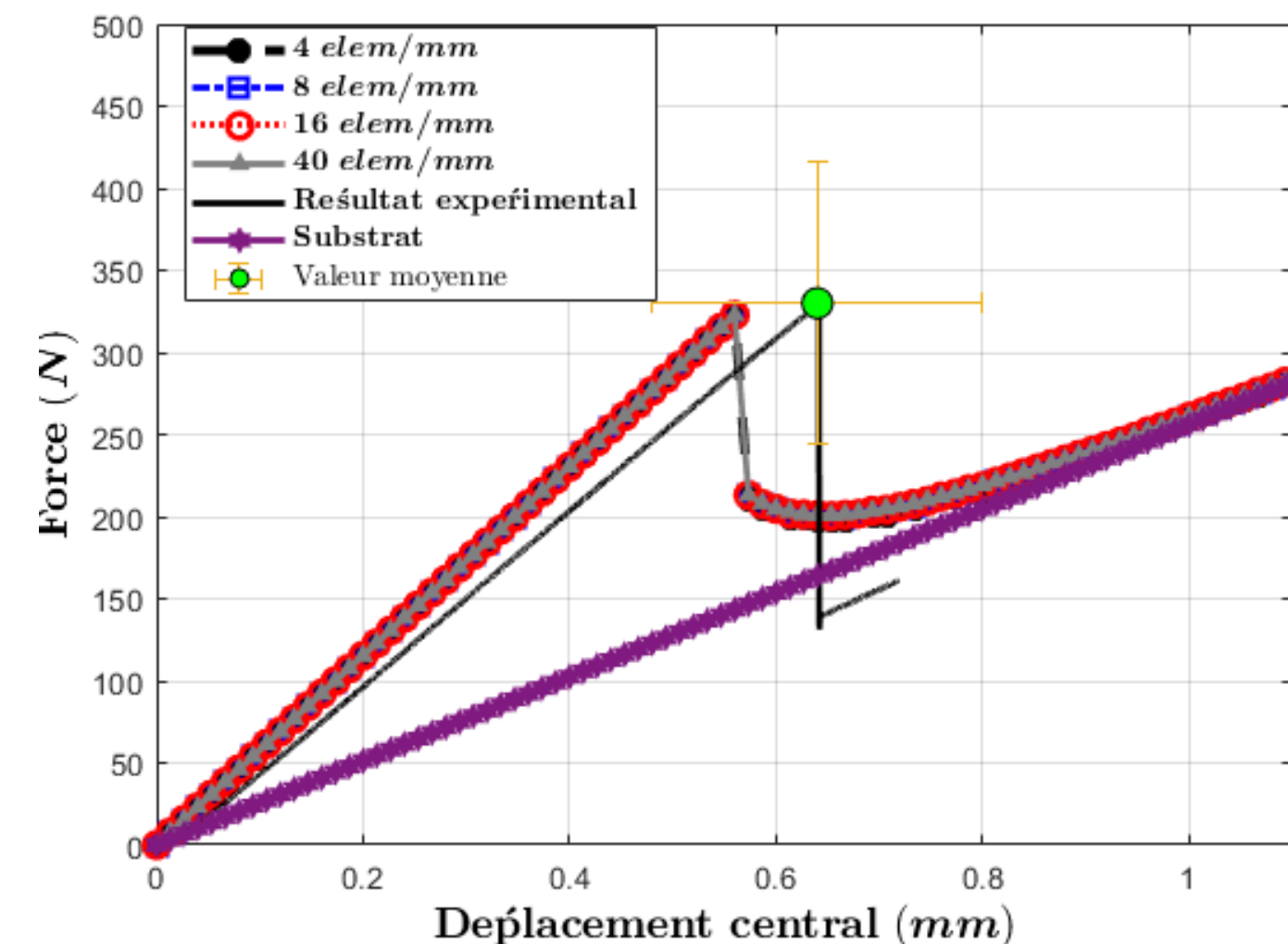
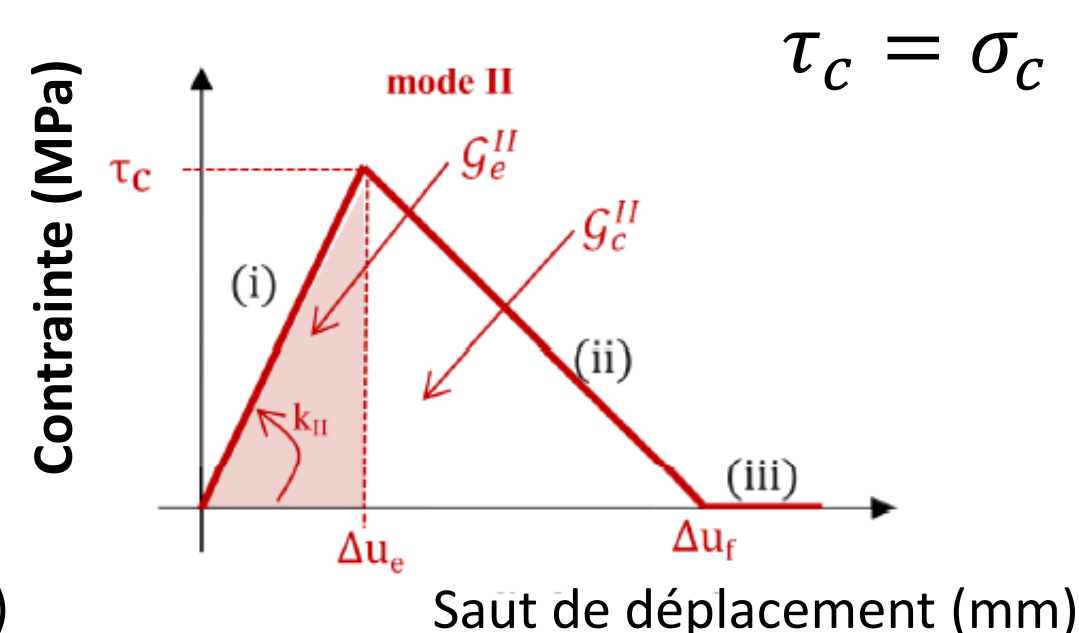
$$k_I = k_{II}$$

$$\tau_c = \sigma_c$$

Pelage (mode I)



Cisaillement (mode II)



# Application des résultats : endommagement de l'interface

Comment l'exploiter ? – loi d'endommagement de l'interface (CZM)

- Utilisation d'une loi de séparation bilinéaire (la même interface avec une autre géométrie)

Propriétés prévues pour  $h_s=1,08\text{mm}$

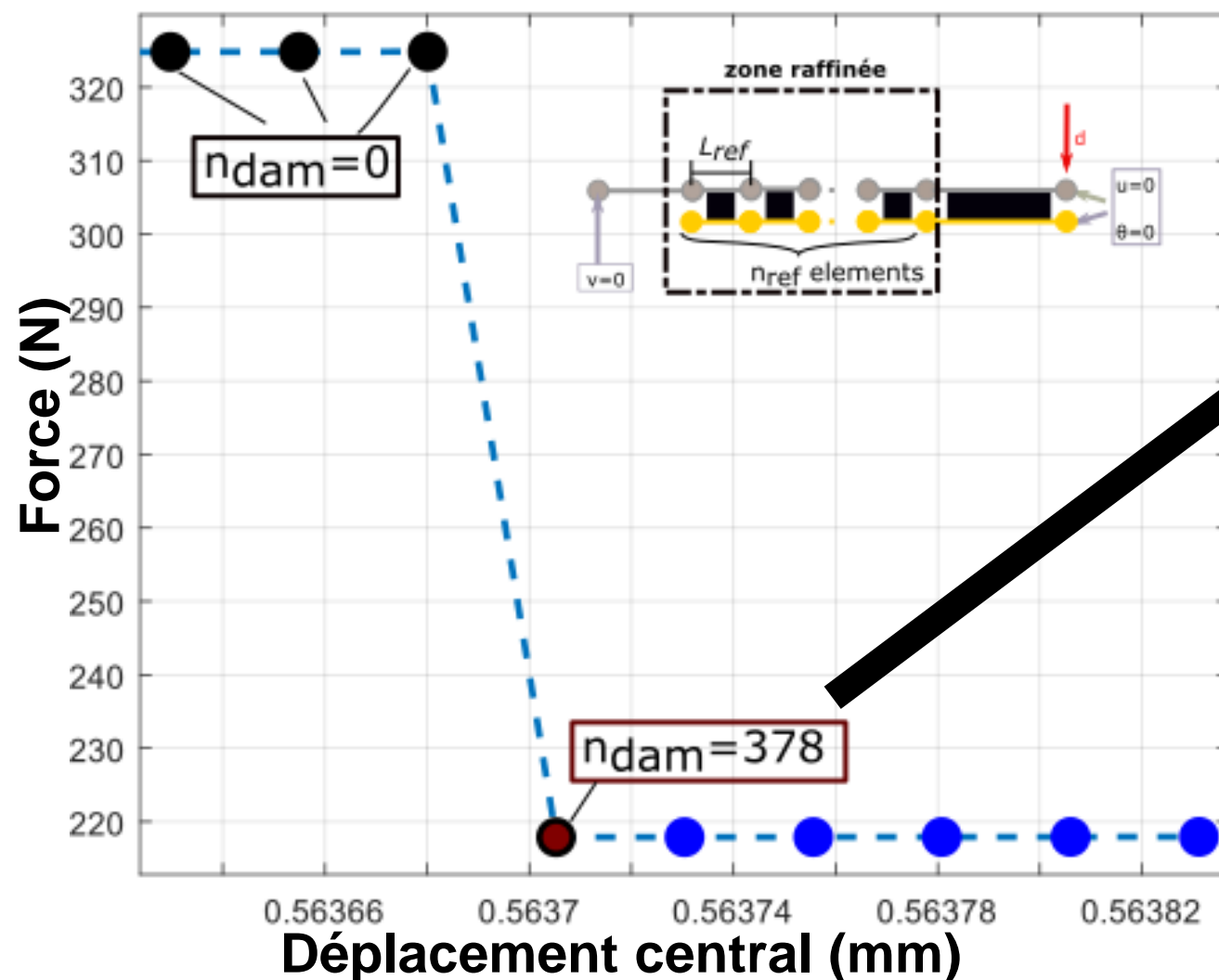
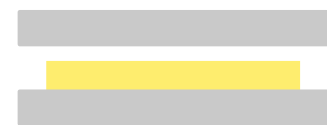
$$\begin{aligned} G_c &= 0,609 \text{ N/mm} \\ \sigma_c &= 48,9 \text{ MPa} \\ k_I &= 2000 \text{ MPa/mm} \end{aligned}$$

Loi bilinéaire avec  
le ME

Amorçage adhésive ( $F_c$ ) en considérant  
 $h_s=1,62 \text{ mm}$



Rupture adhésive



Longueur d'amorçage de rupture

$$a_c^{num} = 4,67 \text{ mm}$$

$$a_c^{exp} = 0,035 \text{ mm}$$

Nombre d'éléments  
endommagés trop élevé :  
**Surestimation de la taille  
d'amorçage ( $a_c$ )**





# Approche numérique - limitations

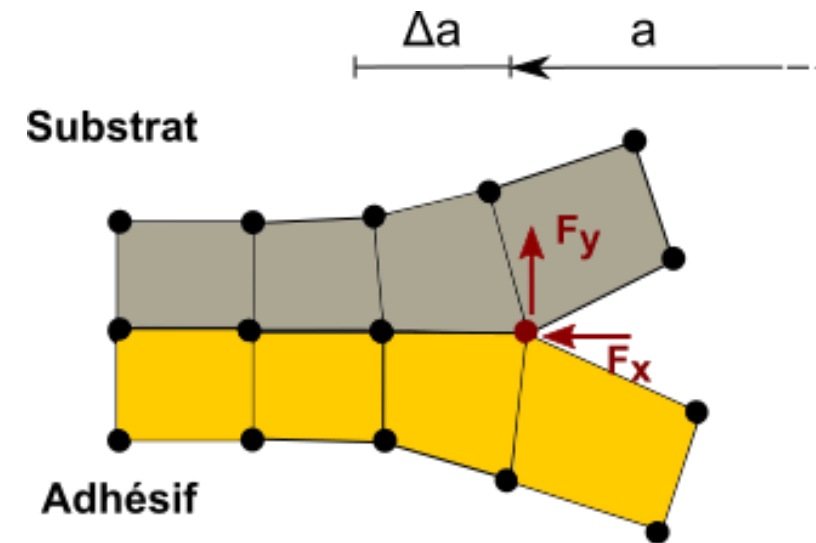
# Limitations de la méthode

- Évaluation du taux de restitution d'énergie (EF 3D) – **interface parfaitement collée**
  - Utilisation de la technique VCCT (Virtual Crack Closure Technique) - **Rybicki et Kanninen 1977**

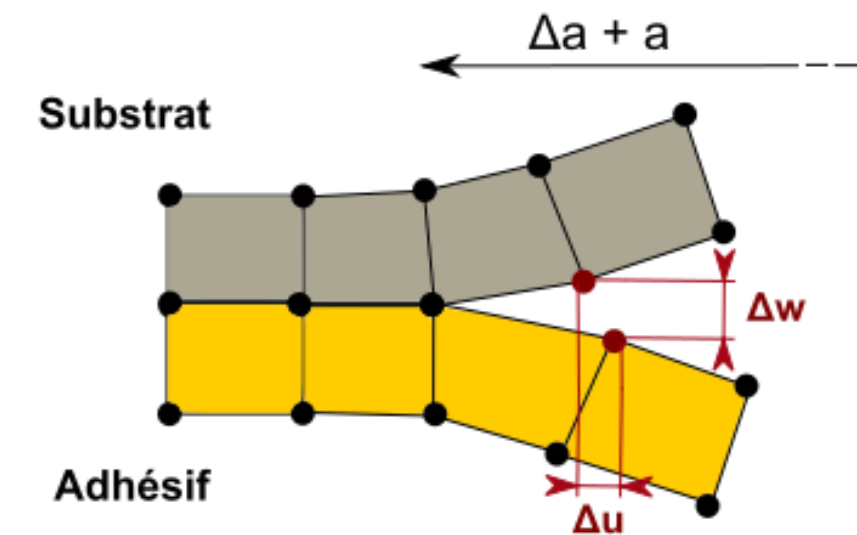
## Interface forte

$$\mathcal{G}^I = \frac{1}{2b\Delta a} F_y \Delta w$$

$$\mathcal{G}^{II} = \frac{1}{2b\Delta a} F_x \Delta u$$



(a)



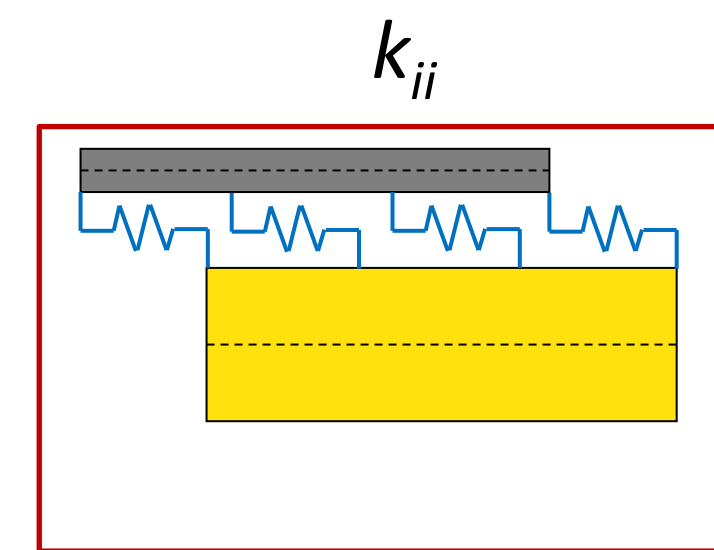
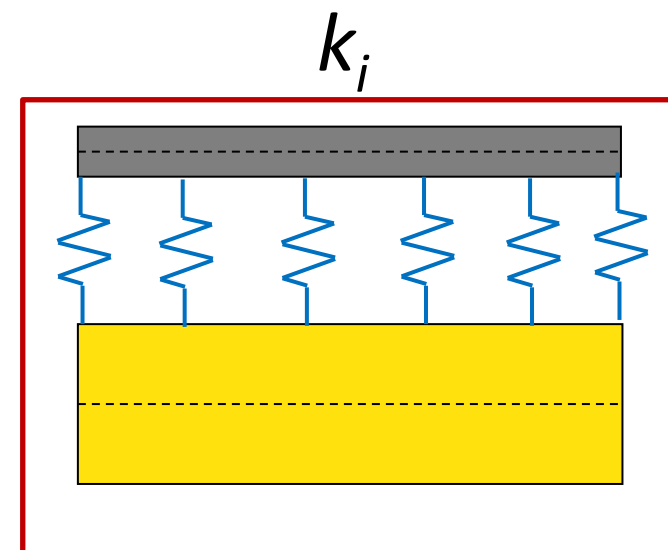
(b)

- Répartition d'énergie via 1D - ME

## Interface faible

$$\mathcal{G}^I = \frac{\sigma^2}{2k_I}$$

$$\mathcal{G}^{II} = \frac{\tau^2}{2k_{II}}$$



# Limitations de la méthode

Évaluation du taux de restitution d'énergie

Utilisation de la technique VCCT (Virtual Crack Closure Technique) - **Rybicki et Kanninen 1977**

## Interface forte

$$\mathcal{G}^I = \frac{1}{2b\Delta a} F_y \Delta w$$

$$\mathcal{G}^{II} = \frac{1}{2b\Delta a} F_x \Delta u$$

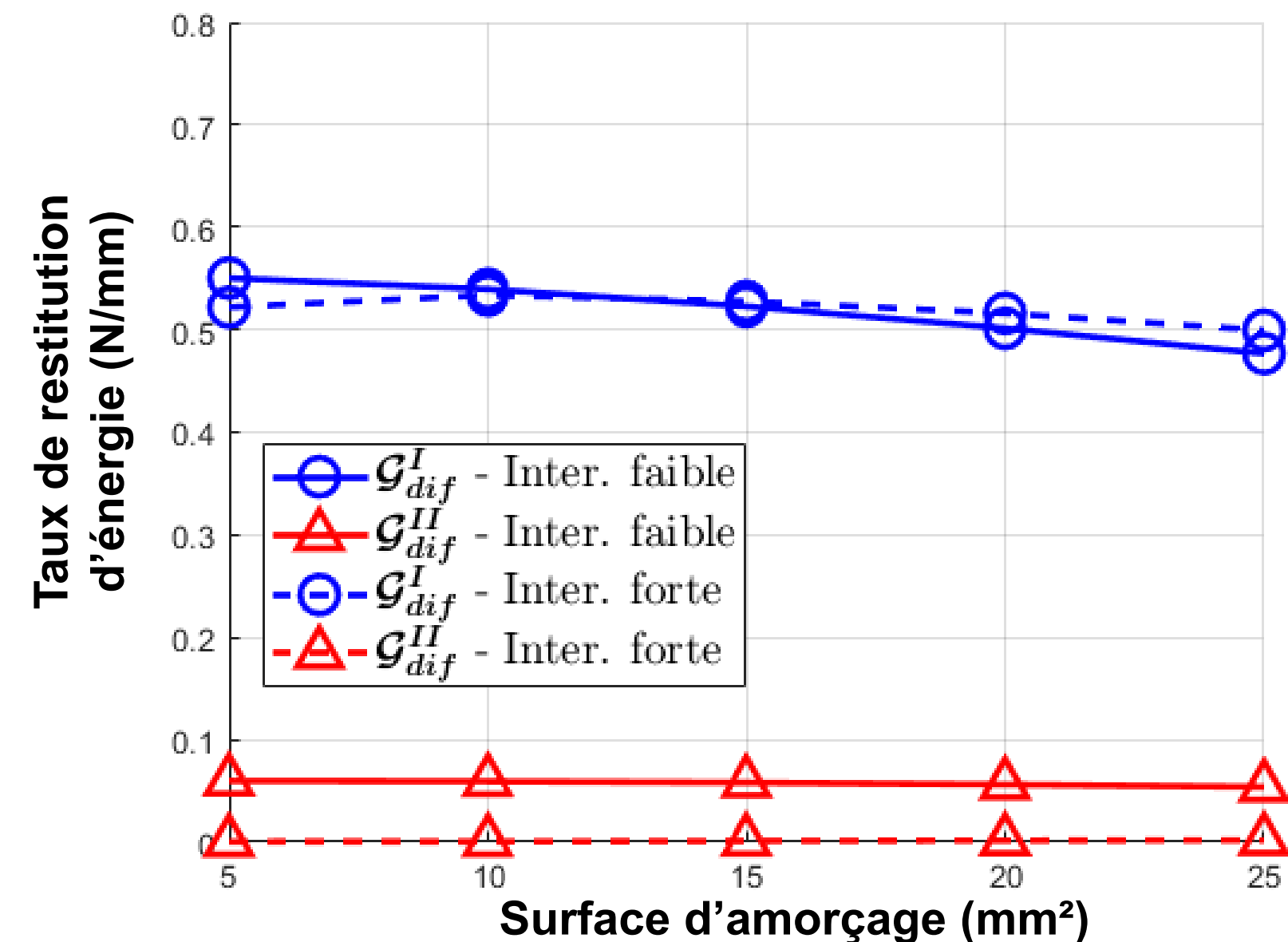
## Interface faible

$$\mathcal{G}^I = \frac{\sigma^2}{2k_I}$$

$$\mathcal{G}^{II} = \frac{\tau^2}{2k_{II}}$$

- La condition  $k_I=k_{II}=2000 \text{ MPa/mm}$  surestime  $\mathcal{G}_{II}$
- Légère surestimation de  $\mathcal{G}_I$

## Interface forte versus interface faible





# Limitations de la méthode

Évaluation du taux de restitution d'énergie

Utilisation de la technique VCCT (Virtual Crack Closure Technique) - **Rybicki et Kanninen 1977**

## Interface forte

$$\mathcal{G}^I = \frac{1}{2b\Delta a} F_y \Delta w$$

$$\mathcal{G}^{II} = \frac{1}{2b\Delta a} F_x \Delta u$$

## Interface faible

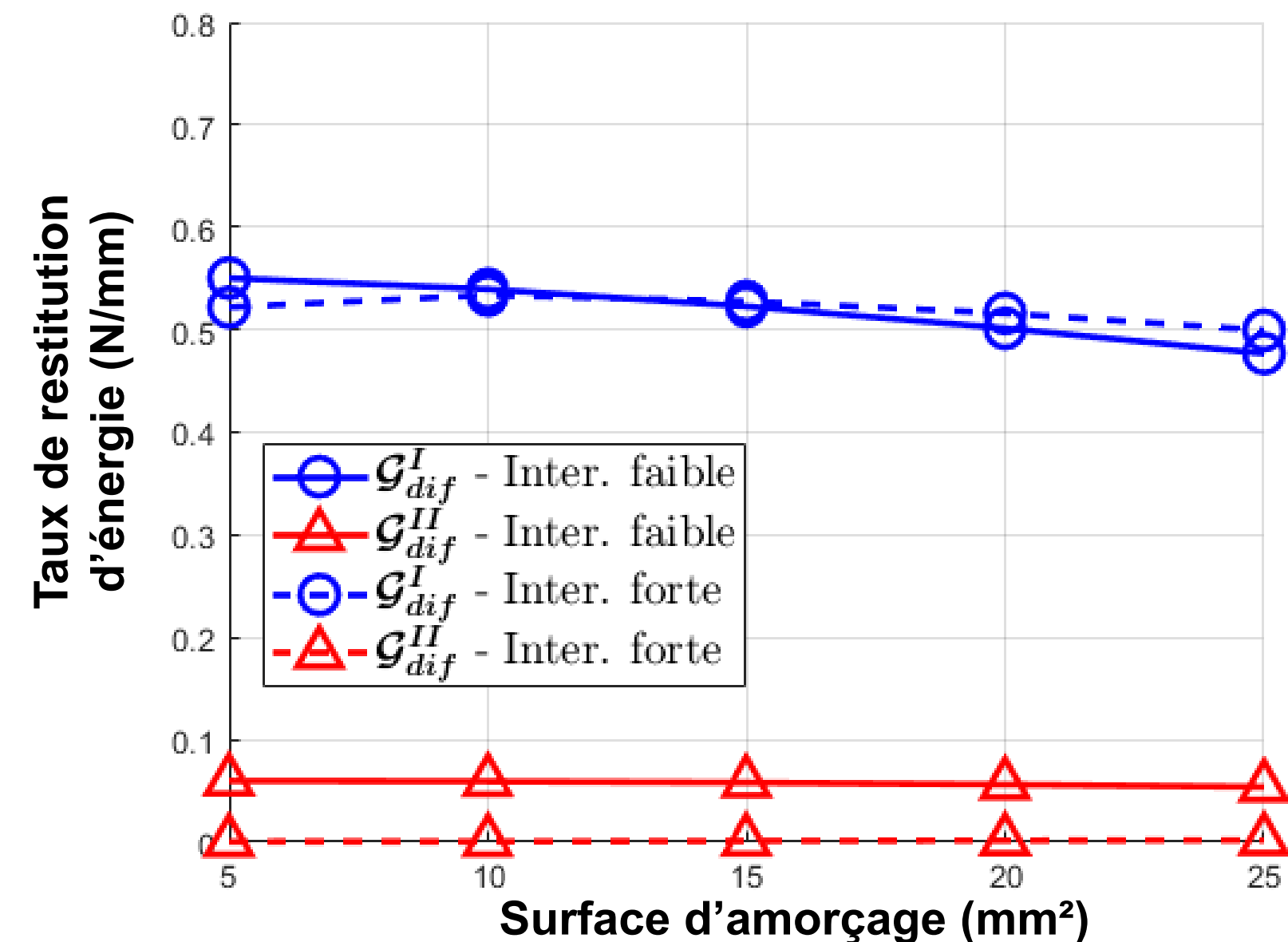
$$\mathcal{G}^I = \frac{\sigma^2}{2k_I}$$

$$\mathcal{G}^{II} = \frac{\tau^2}{2k_{II}}$$

- La condition  $k_I=k_{II}=2000 \text{ MPa/mm}$  surestime  $\mathcal{G}_{II}$
- Légère surestimation de  $\mathcal{G}_I$

$\mathcal{G}_I$  et  $\mathcal{G}_{II}$  vont converger si  $k_I$  et  $k_{II}$  sont très élevés

## Interface forte versus interface faible



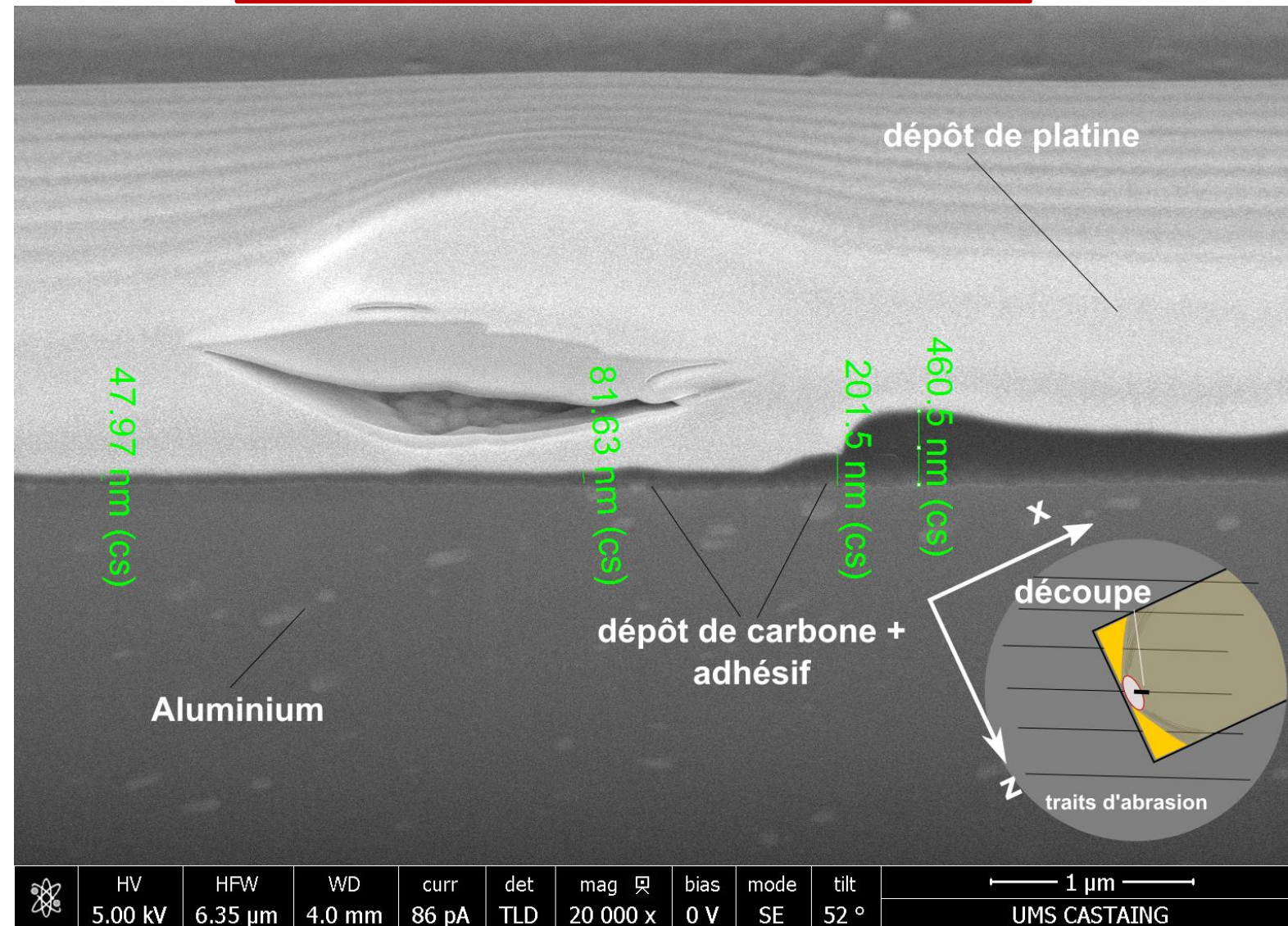


# Conclusion

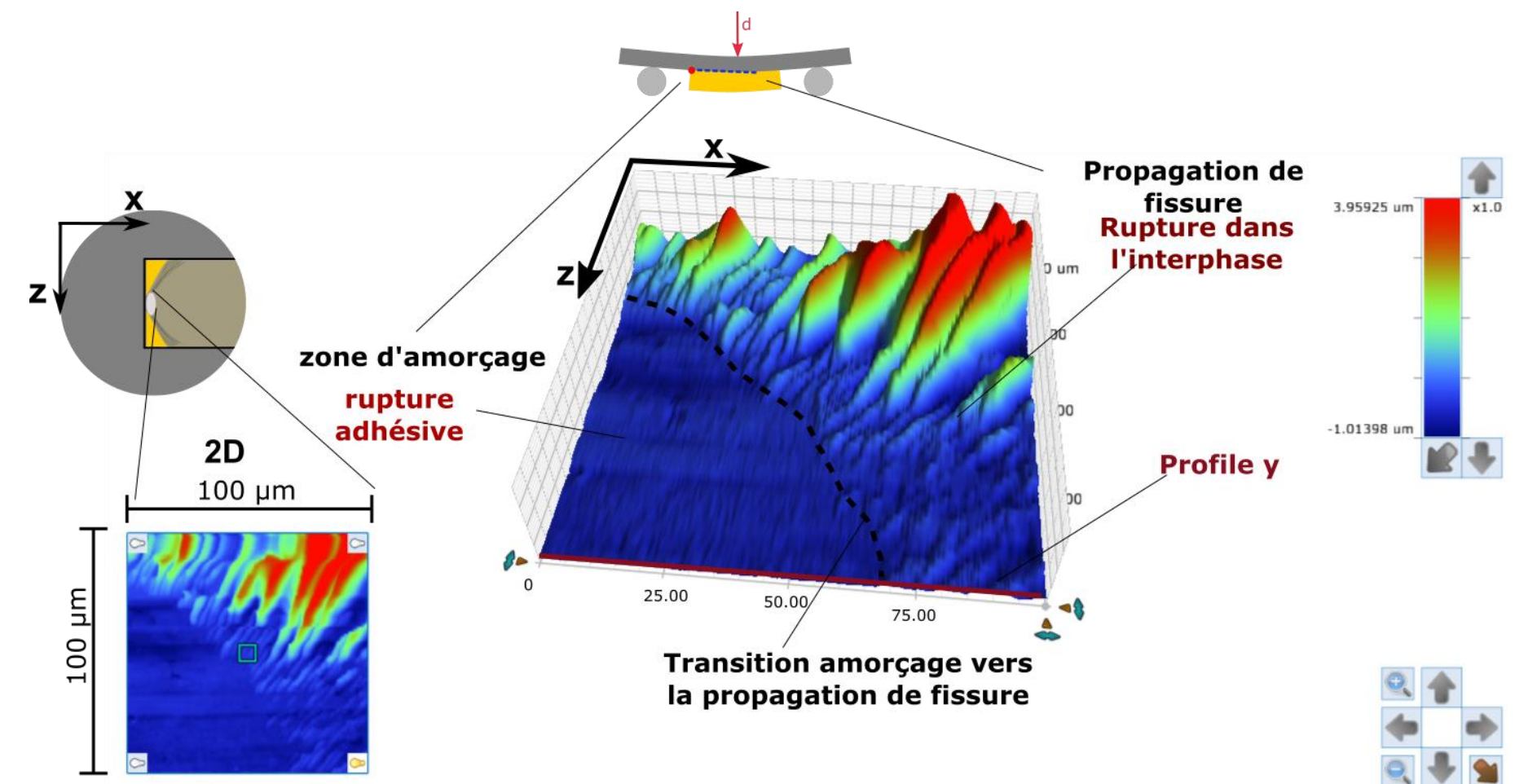
# Conclusion

- La zone d'amorçage correspond à une rupture adhésive :  
FIB + profilomètre → critère adhésif (100 nm)

# FIB

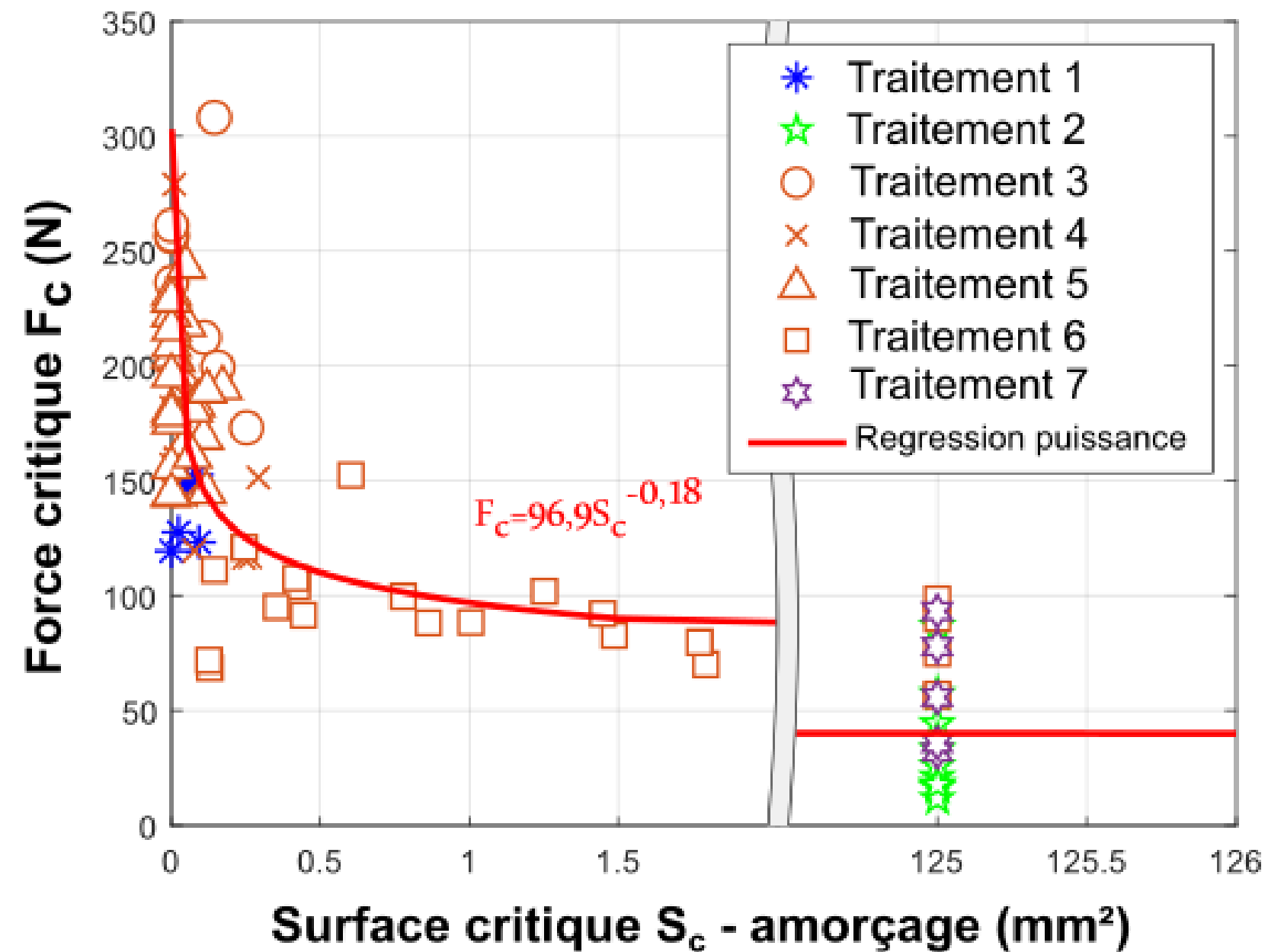


# Profilomètre



# Conclusion

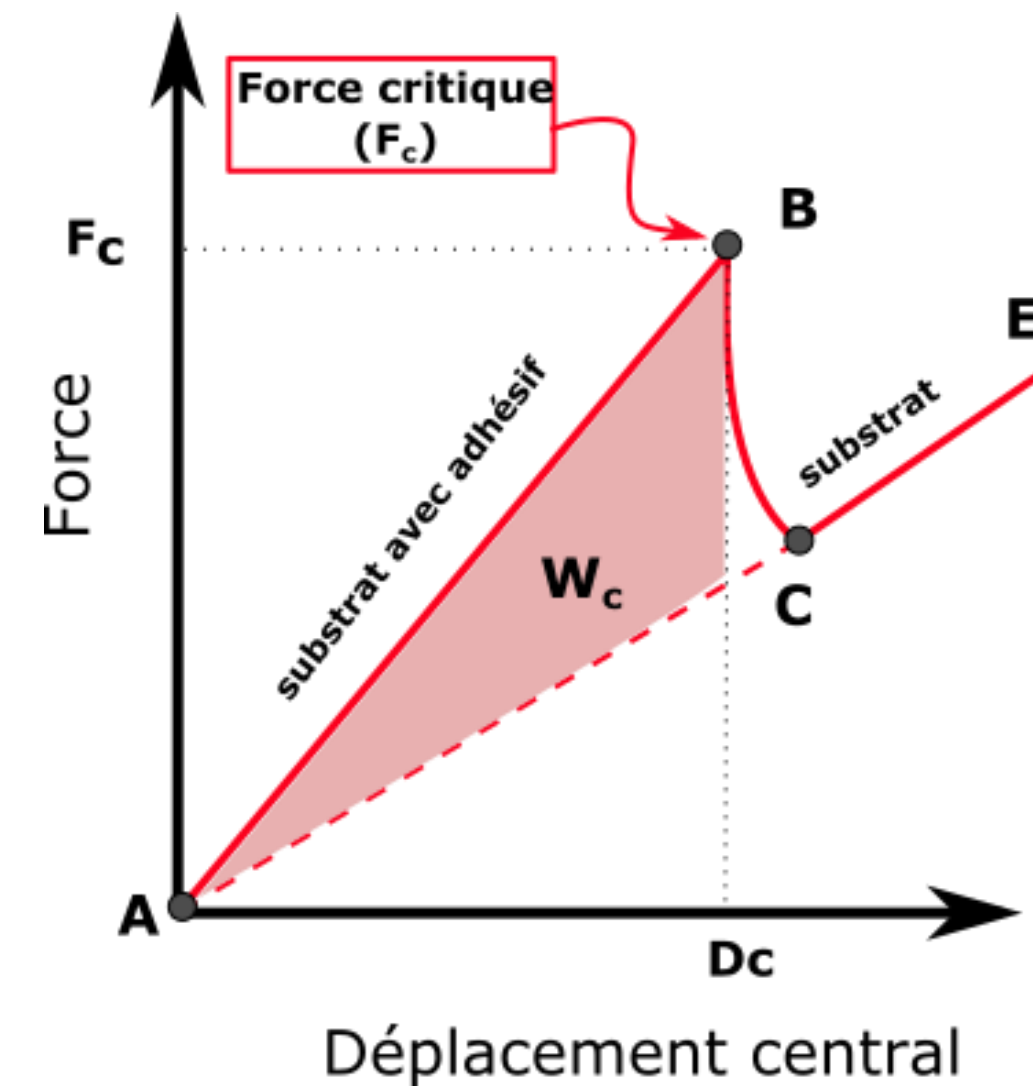
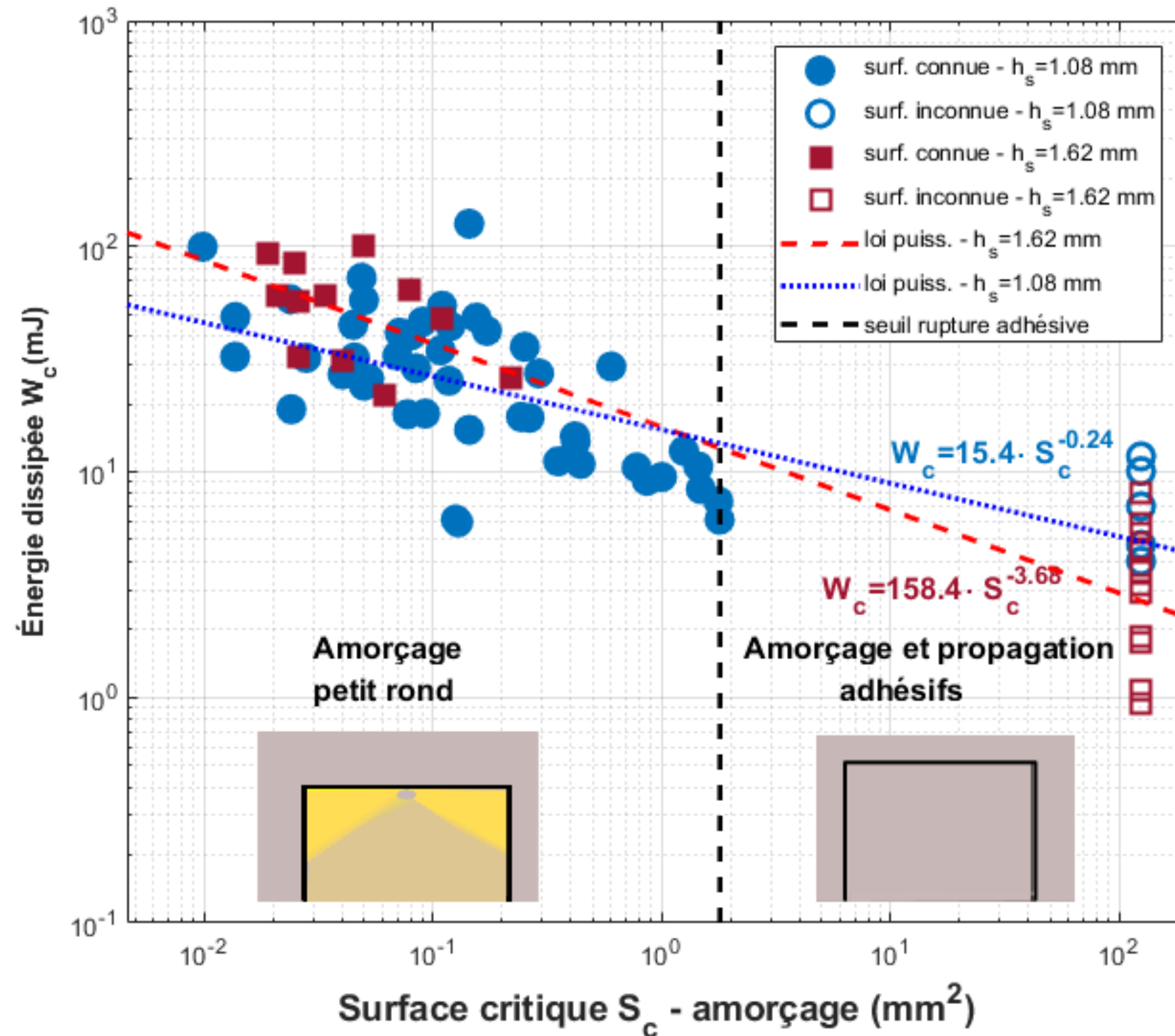
- Le type d'amorçage et de propagation dépend du traitement de surface





# Conclusion

- L'approche énergétique globale n'est pas suffisante → mécanique de la rupture





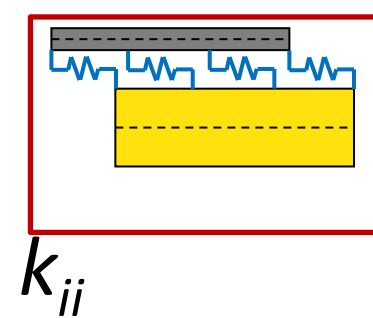
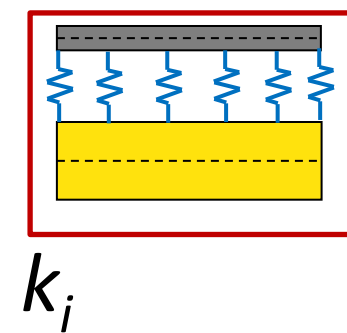
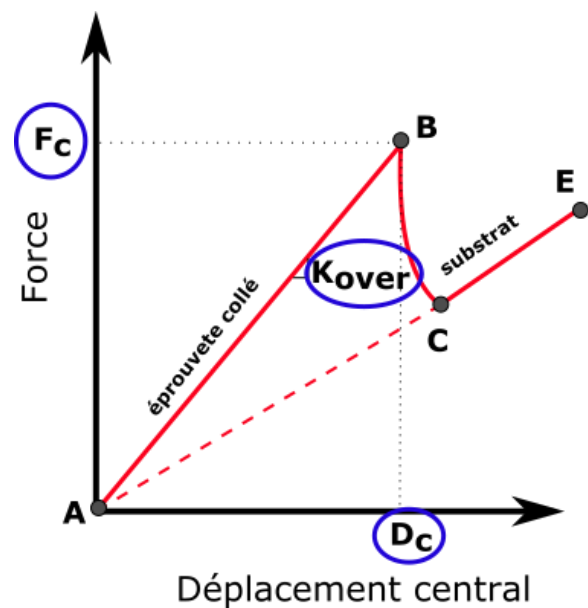
# Conclusion

- Proposition d'une méthodologie d'exploitation des résultats

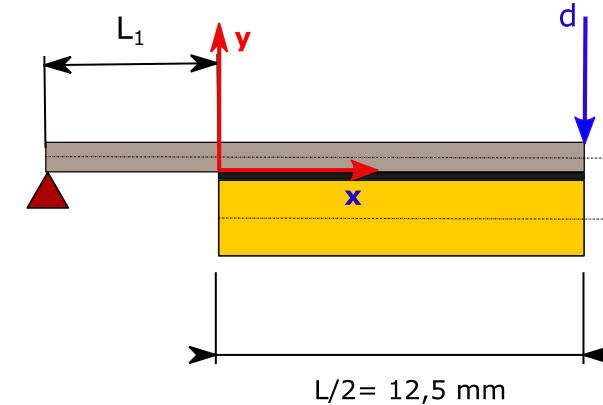
## Étape 1

Calage de  
paramètres

Données  
expérimentales

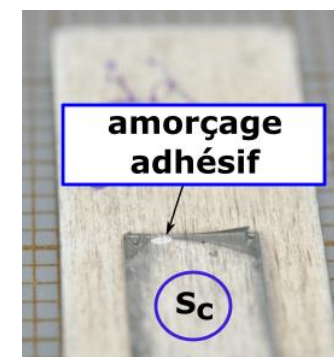


$L_1, k_i, k_{ij}$



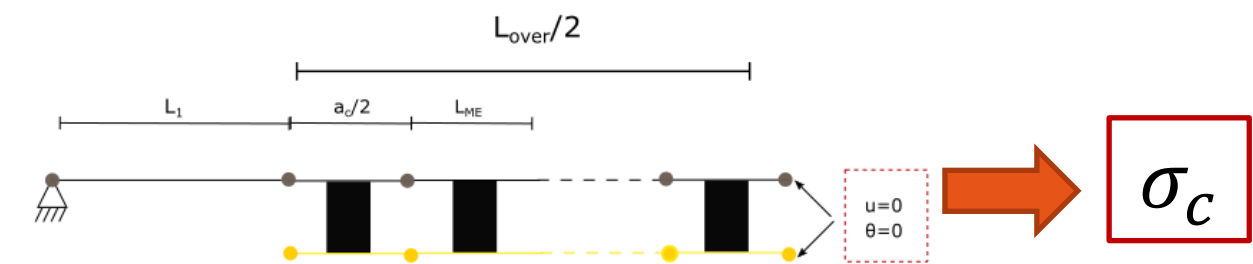
$D_c$

$S_c$



## Étape 2

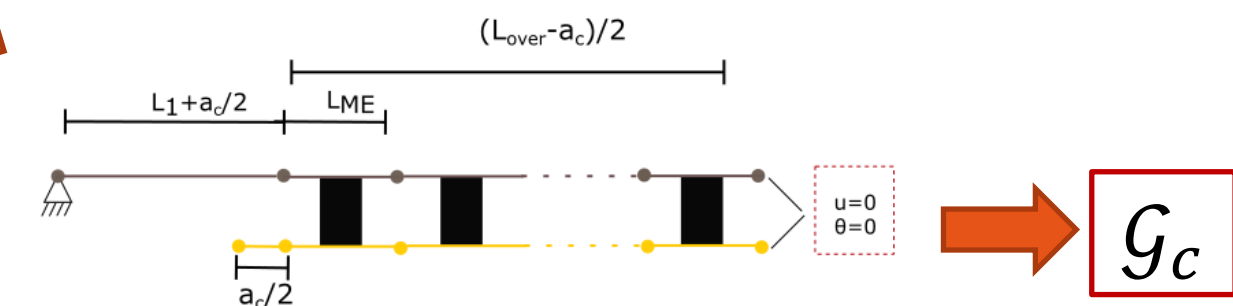
Critère de  
contrainte



*Éprouvette non-fissurée*

## Étape 3

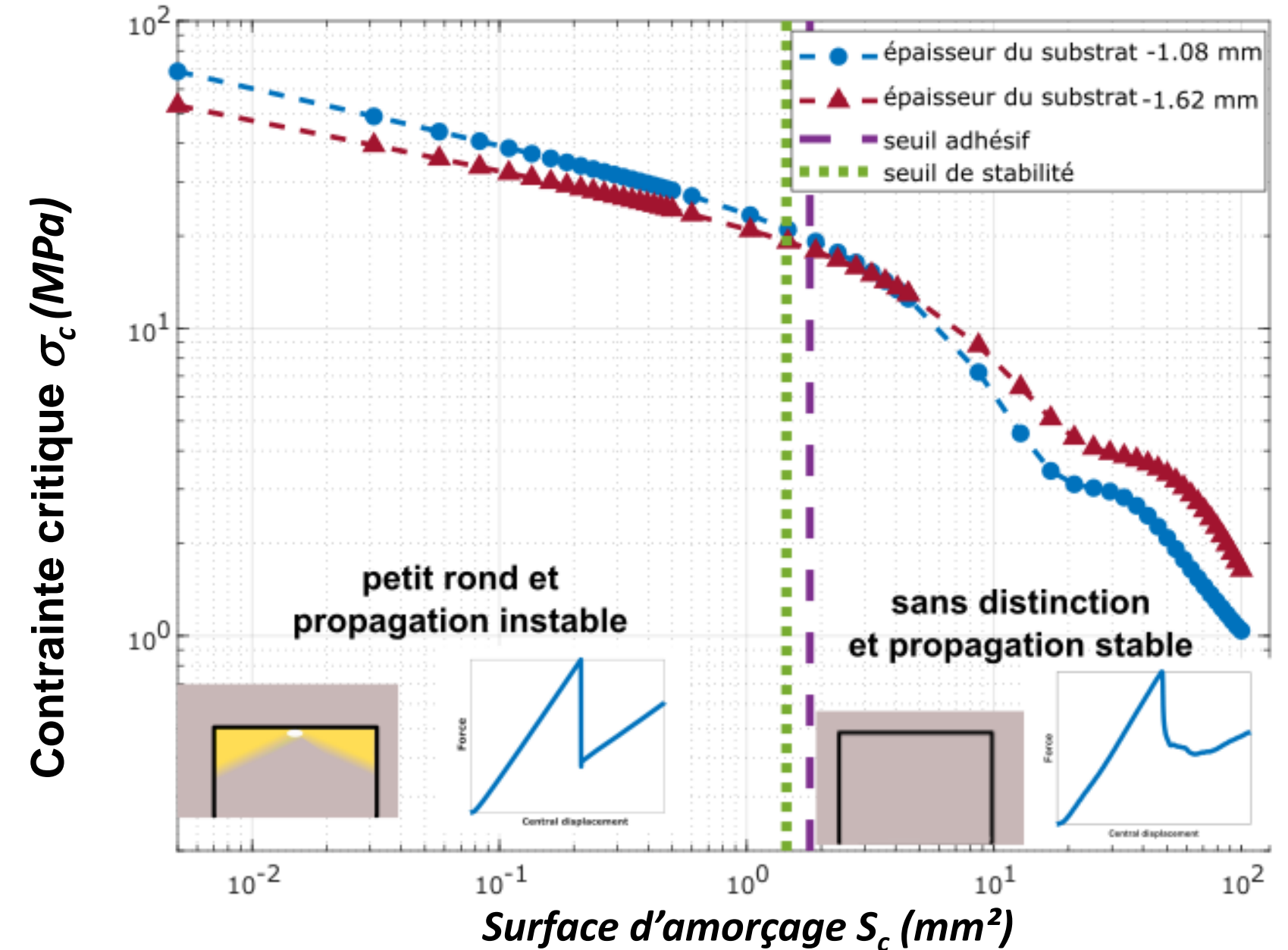
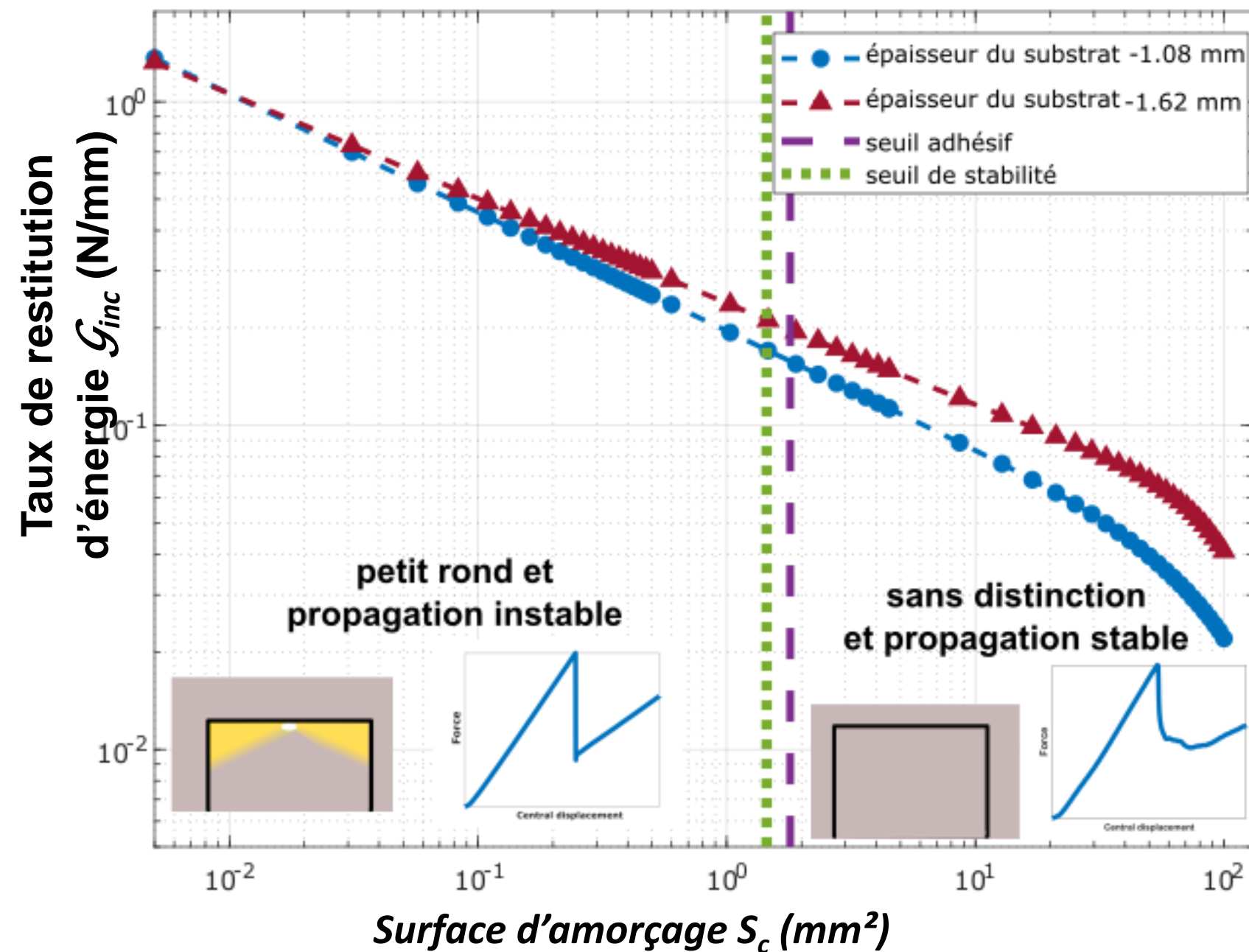
Critère d'énergie



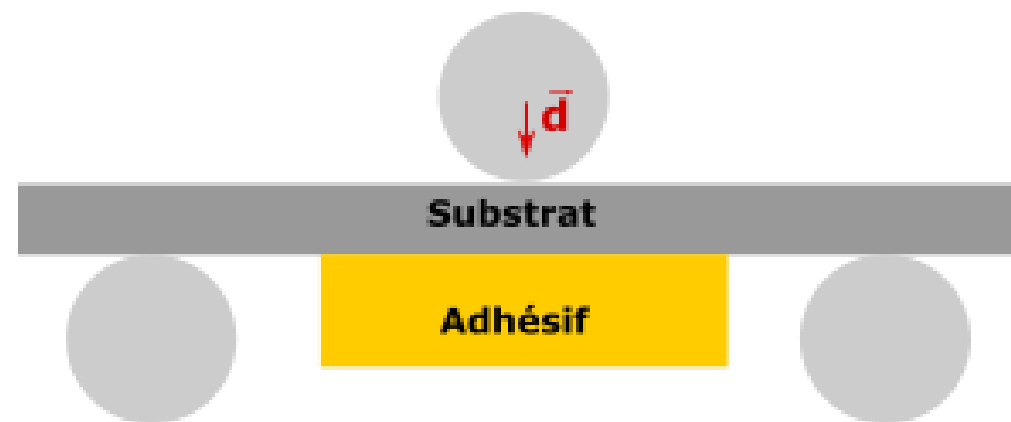
*Éprouvette fissurée*

# Conclusion

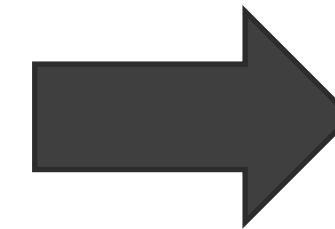
- L'approche par ME permet une première prédiction et comprendre numériquement les phénomènes



# Conclusion



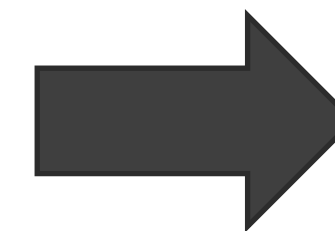
**cohésive**



**Collage accepté**



**adhésive**




**Collage qui pourrait être accepté**



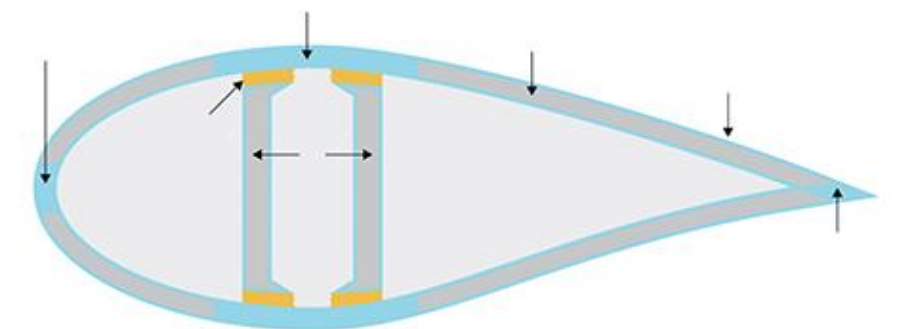
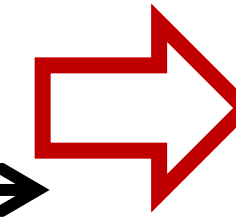
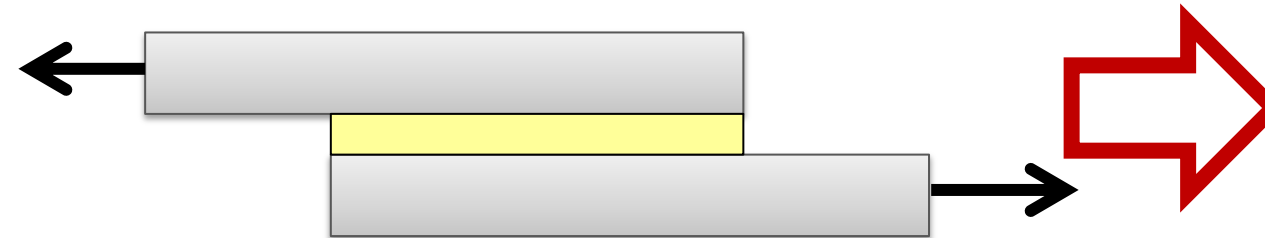
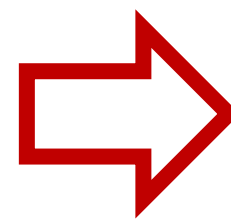
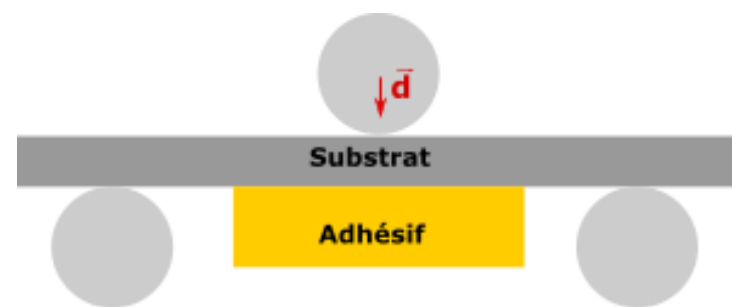
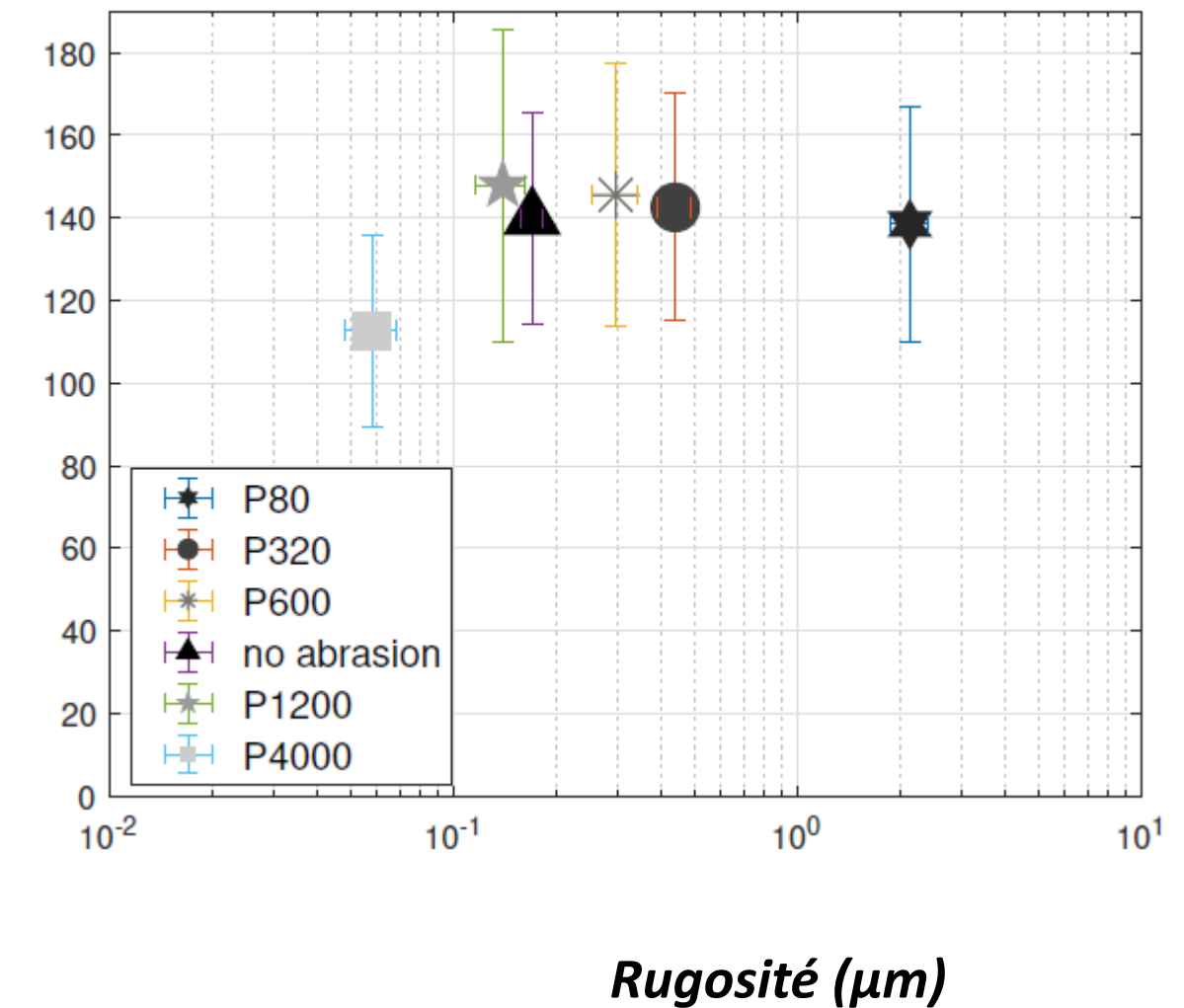
# Perspectives

Court  
terme

- Influence d'autres paramètres sur l'adhérence
  - rugosité, 
  - épaisseur interphase,
  - viscosité..

Long  
terme

- Appliquer la démarche à une autre structure afin de prévoir la rupture adhésive :
  - Comment résoudre la *mixité* ?



# Prédiction de la rupture adhésive des assemblages collés métalliques

**Présenté par : Thiago Birro<sup>1,2</sup>**

**Encadrement :** Frédéric LACHAUD<sup>1</sup>, Maëlen AUFRAY<sup>2</sup>, Éric PAROISSIEN<sup>1</sup>

**08 juillet 2021, Toulouse**

<sup>1</sup>Institut Clément Ader (ICA), Université de Toulouse, ISAE-SUPAERO, IMT MINES ALBI, UTIII, INSA, CNRS, 3 Rue Caroline Aigle, 31400 Toulouse, France.

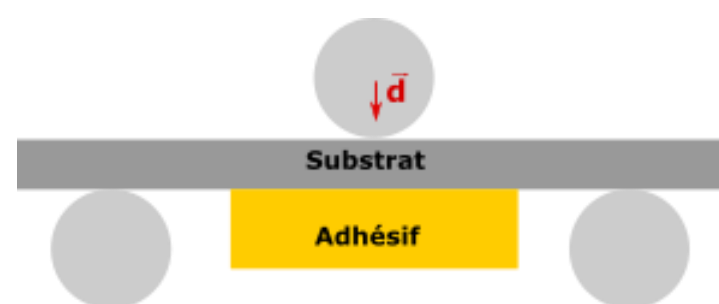
<sup>2</sup>CIRIMAT, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, 4, allée Émile Monso -BP 44362, 31030 Toulouse Cedex 4, France.



# Amorçage adhésif en mode II et mixte

## La démarche envisagée

1<sup>er</sup>  
verrou



Ou d'autre essai

*Point de départ*

Simulation +  
biblio

Modifications de la  
géométrie  
et CL

Zone d'amorçage en mode  
II et mixte



*Objectif*



Zone d'amorçage en mode  
II et mixte

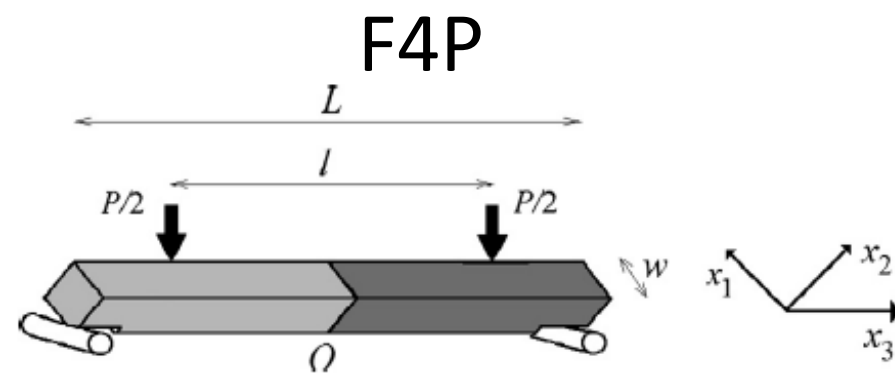
lois d'interactions  
d'amorçage + CC (ou  
d'autre méthodes)

Caractérisation en mode II  
et mixte

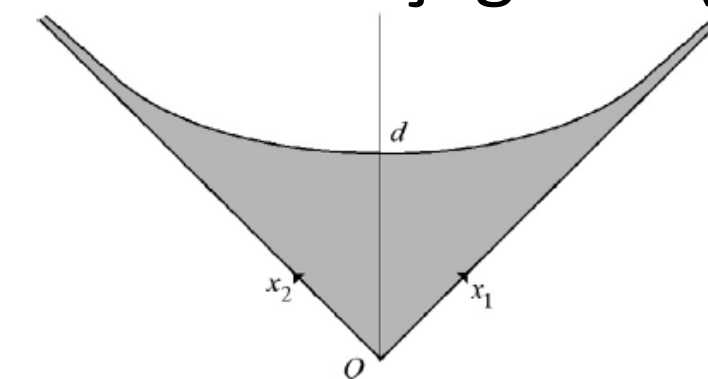
2<sup>eme</sup>  
verrou

# Formation du petit rond

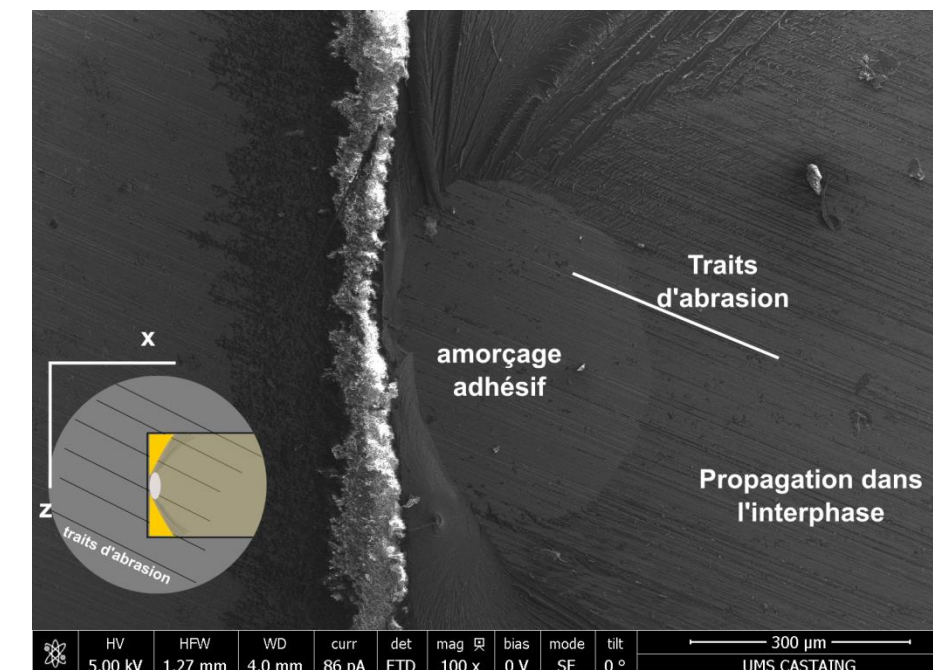
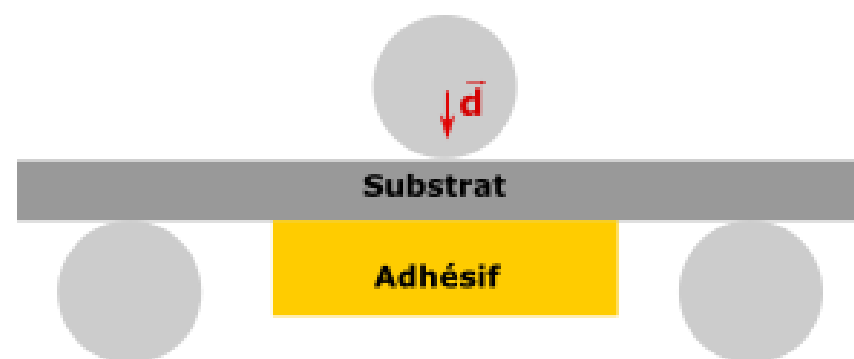
- Modèle simplifié pour les analyses ME
- À envisager: regarder l'isovaleur (3D) - **Leguillon 2014**



Modélisation d'amorçage 3D (**Leguillon 2014**)



- Et pour la F3P ?



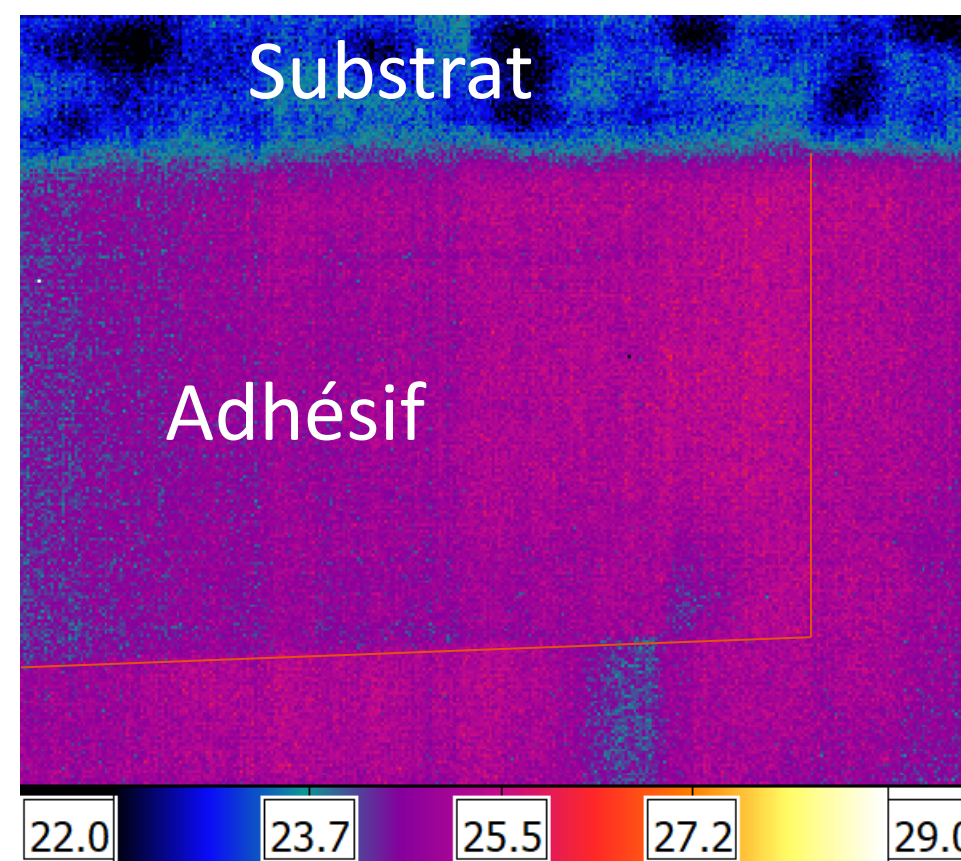
Transition:  
isovaleur ??

# Formation du petit rond

- Modèle simplifié pour les analyses ME
- À envisager: regarder l'isovaleur (3D) - **Leguillon 2014**
- Visualisation de la zone d'amorçage: à envisager
  - Visualisation latérale: encore limitée pour la formation du rond

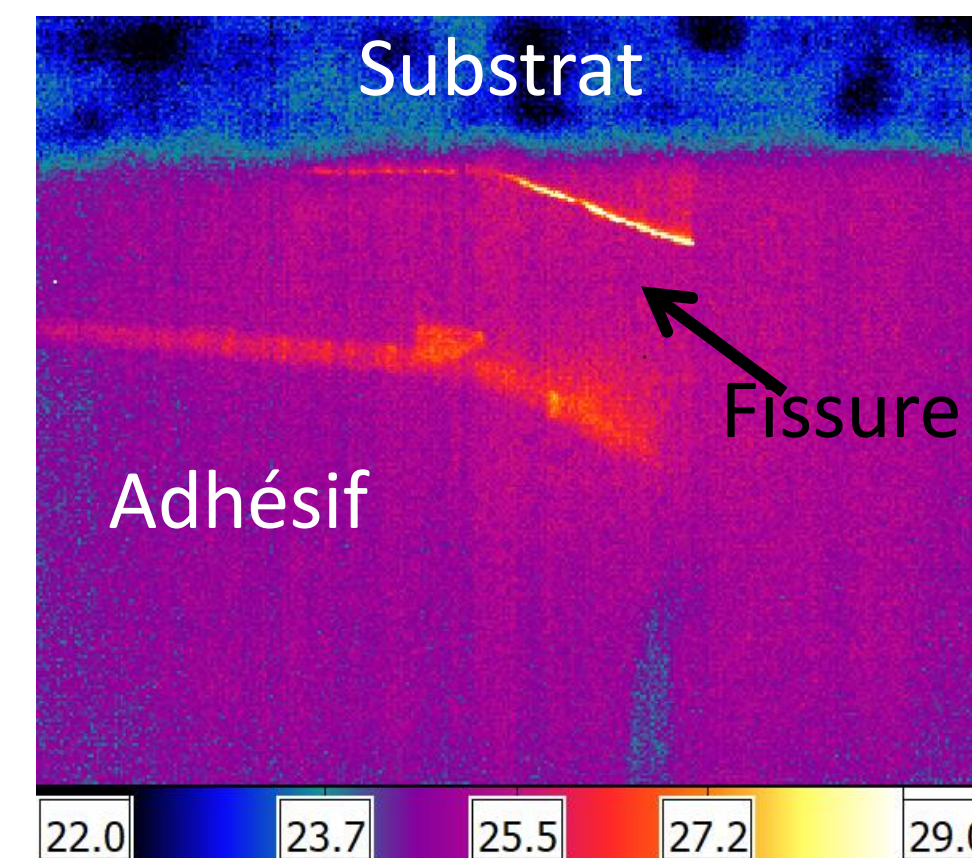


Amorçage avec caméra  
thermique



Soutenance de thèse – VASCONCELLOS BIRRO Thiago

Zone d'amorçage



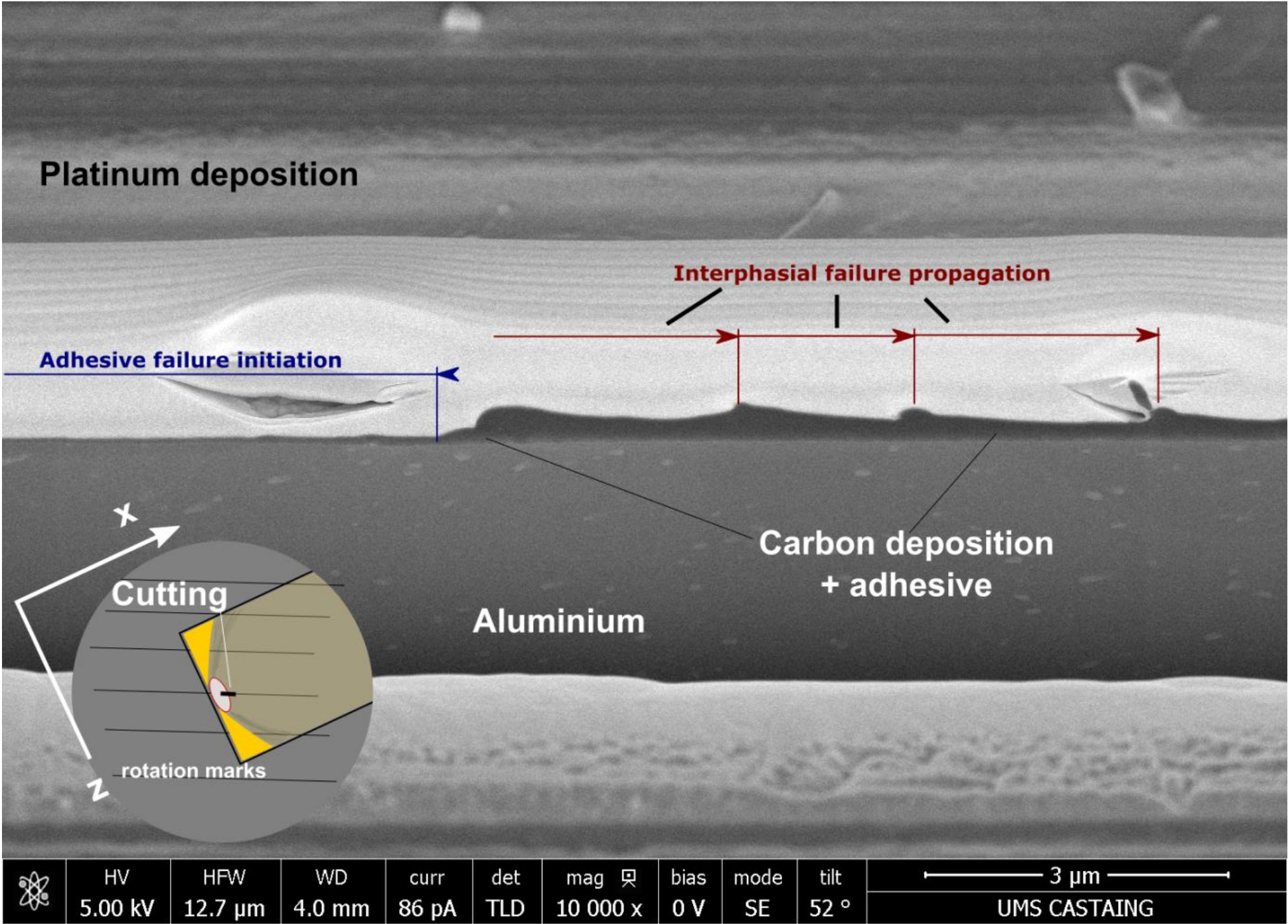
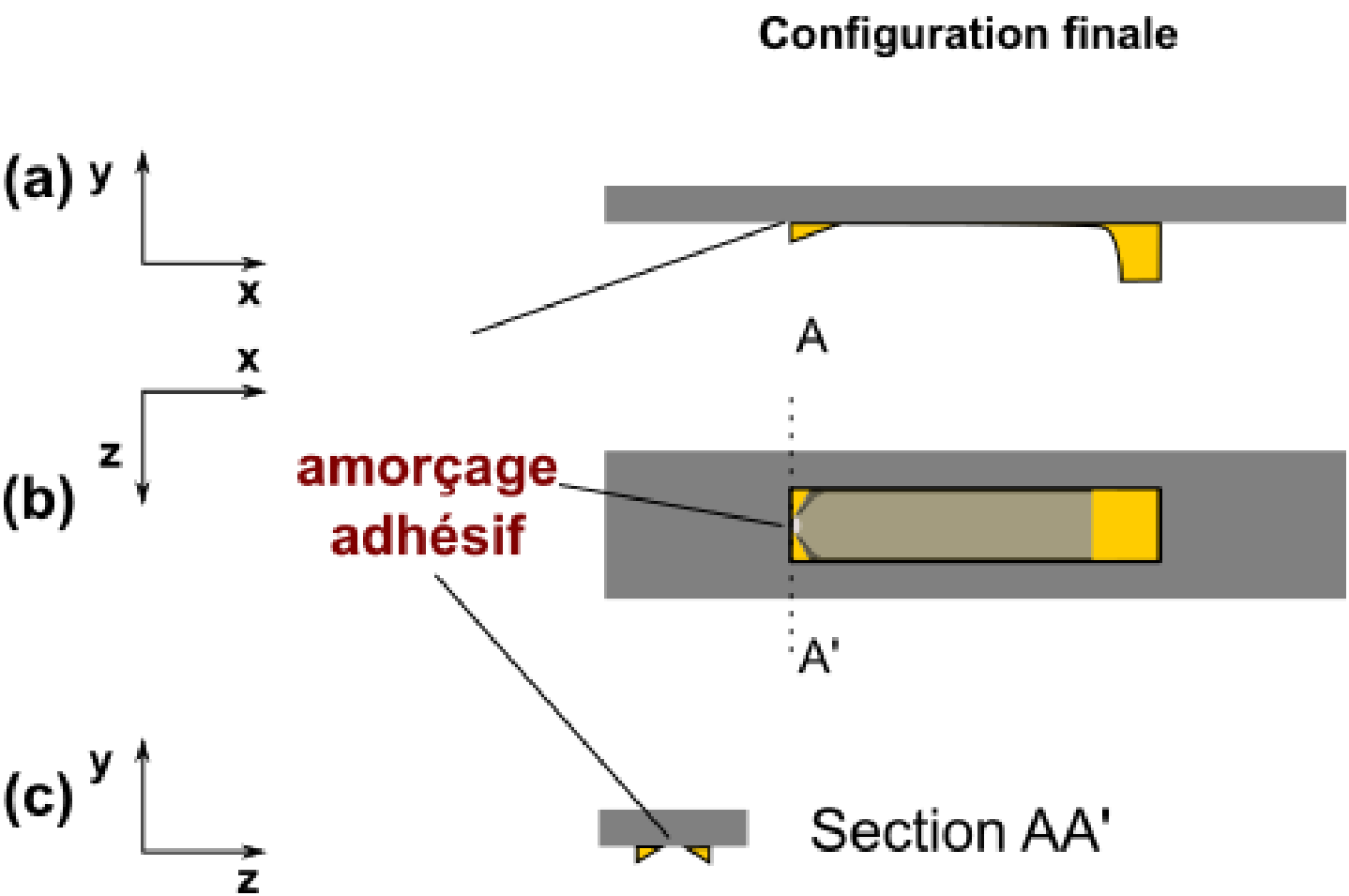
77

08/07/2021



# Rupture adhésive– analyse par SEM + FIB

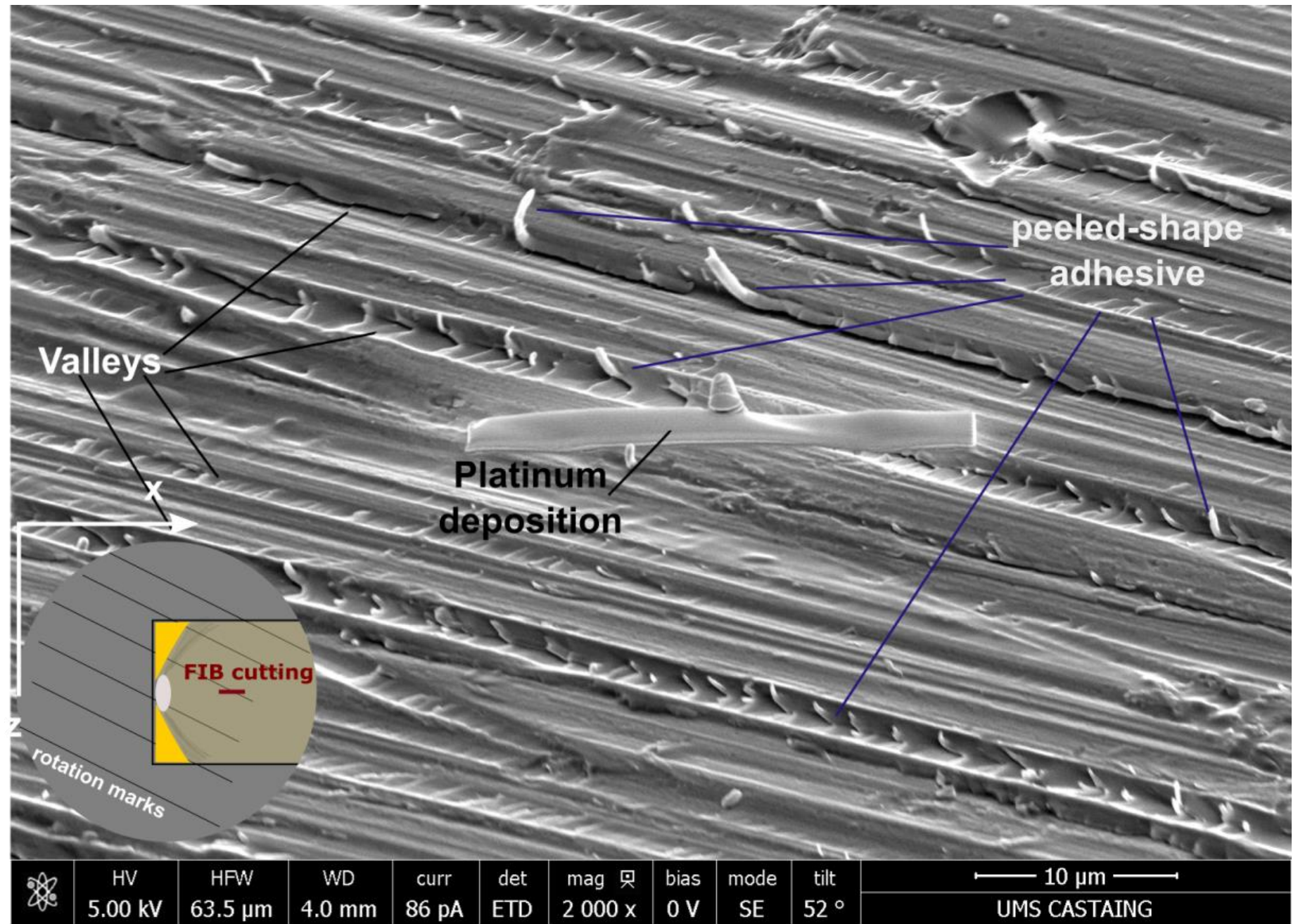
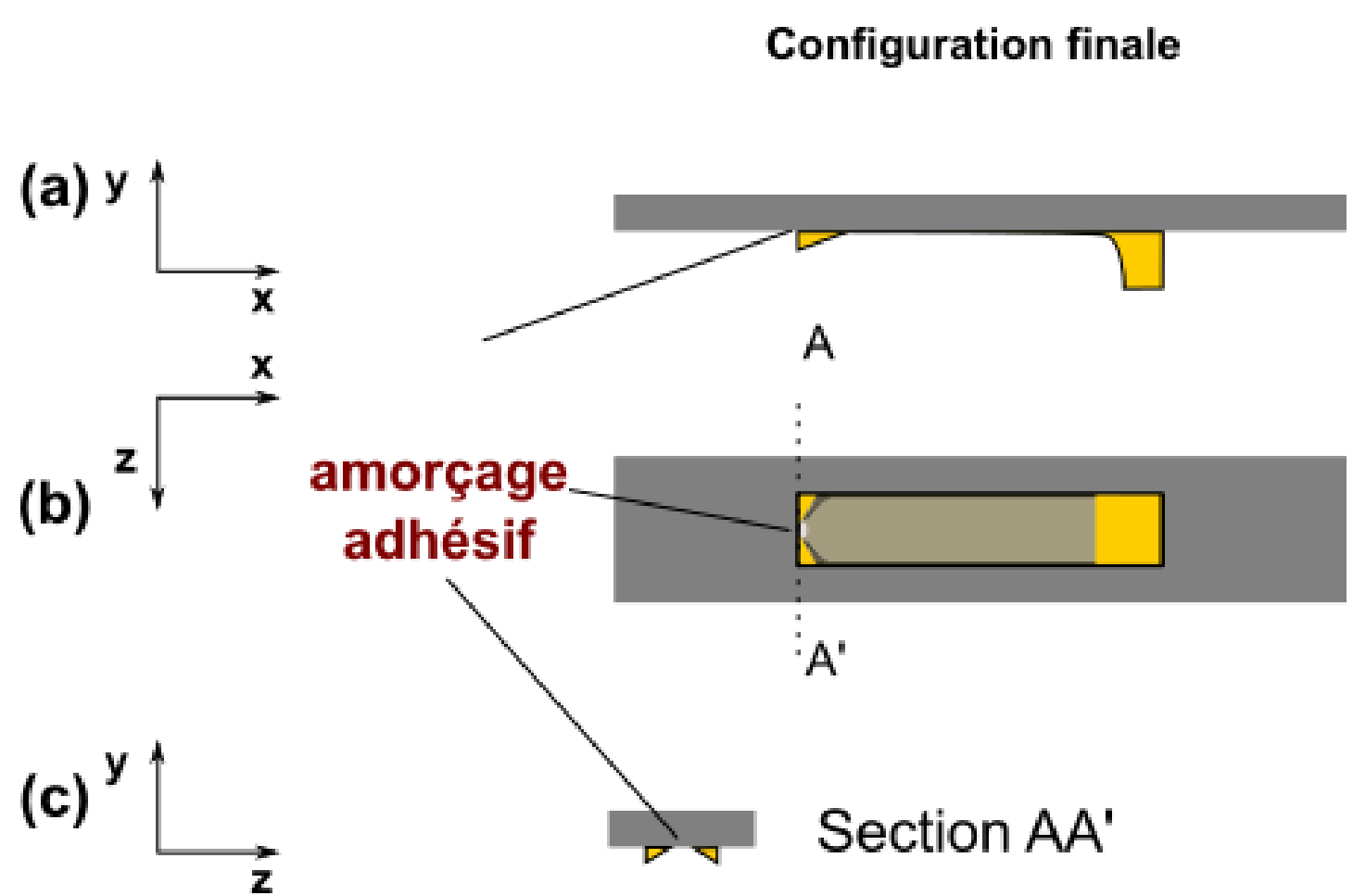
## Transition amorçage adhésif– propagation interphasial





# Rupture adhésive– analyse par SEM + FIB

## Propagation dans l'interphase





# Application des résultats – endommagement de l’interface - $h_s=1,08\text{mm}$

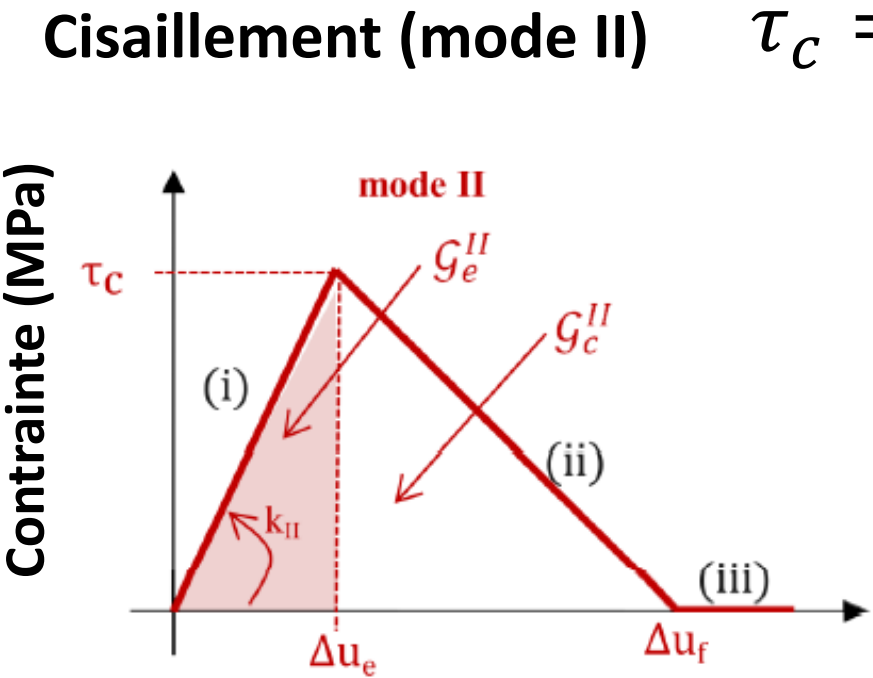
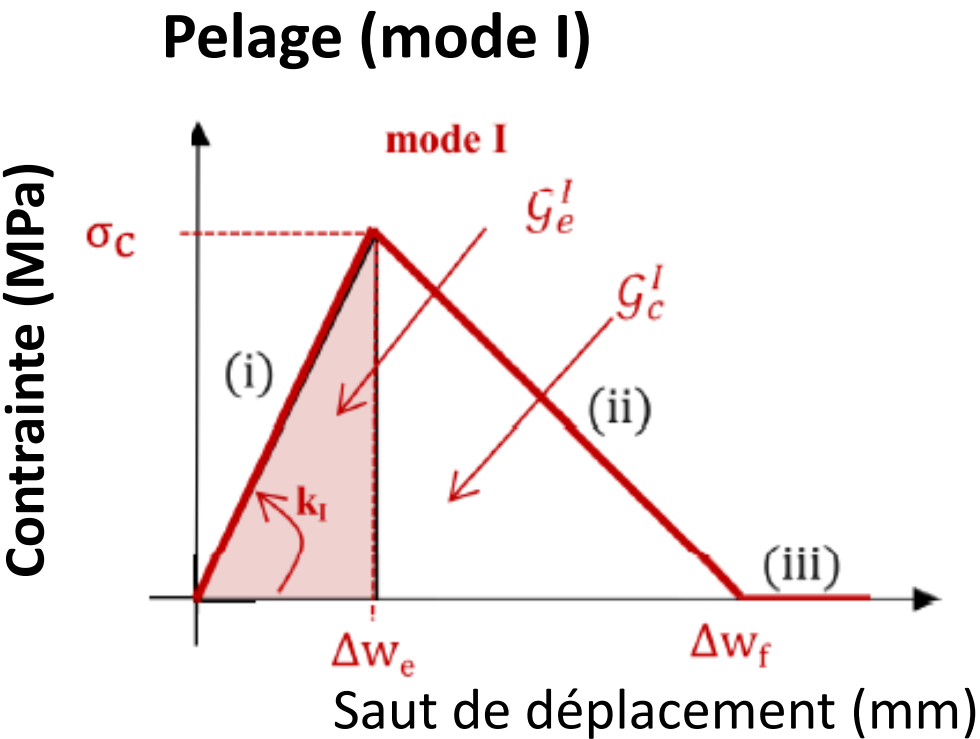
Propriétés prévues pour  $h_s=1,08\text{mm}$  – via CC

$h_s$ (mm)	$\sigma_c$ (MPa)	$\mathcal{G}_c$ (N · mm <sup>-1</sup> )	$k_i = k_{ii}$ (N · mm <sup>-1</sup> )
1.08	48.9	0.609	2000

$\mathcal{G}_{Ic} = \mathcal{G}_{IIc} = \mathcal{G}_c$

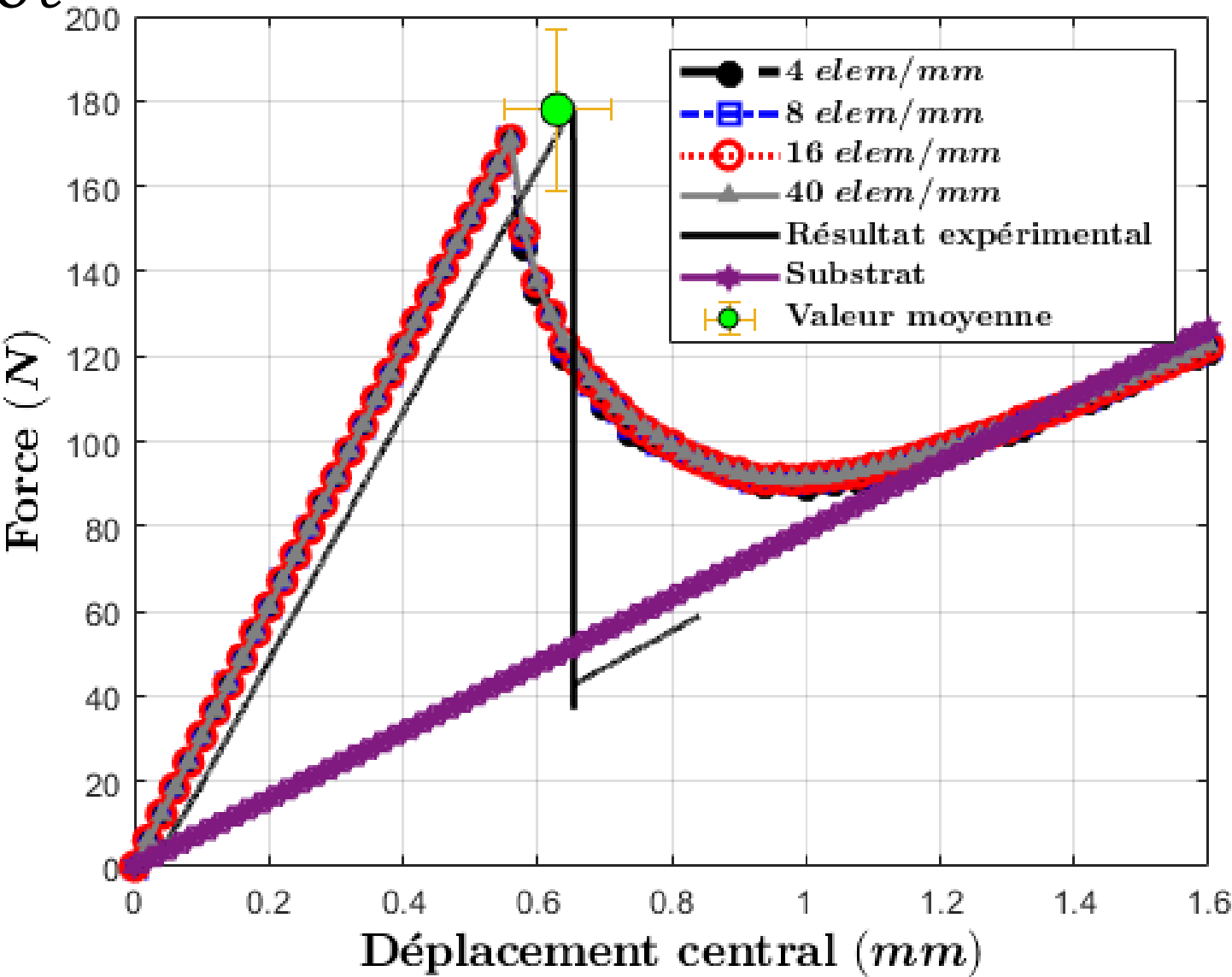
$k_I = k_{II}$

$\tau_c = \sigma_c$



Critère d’endommagement:  $d=0,9999999$

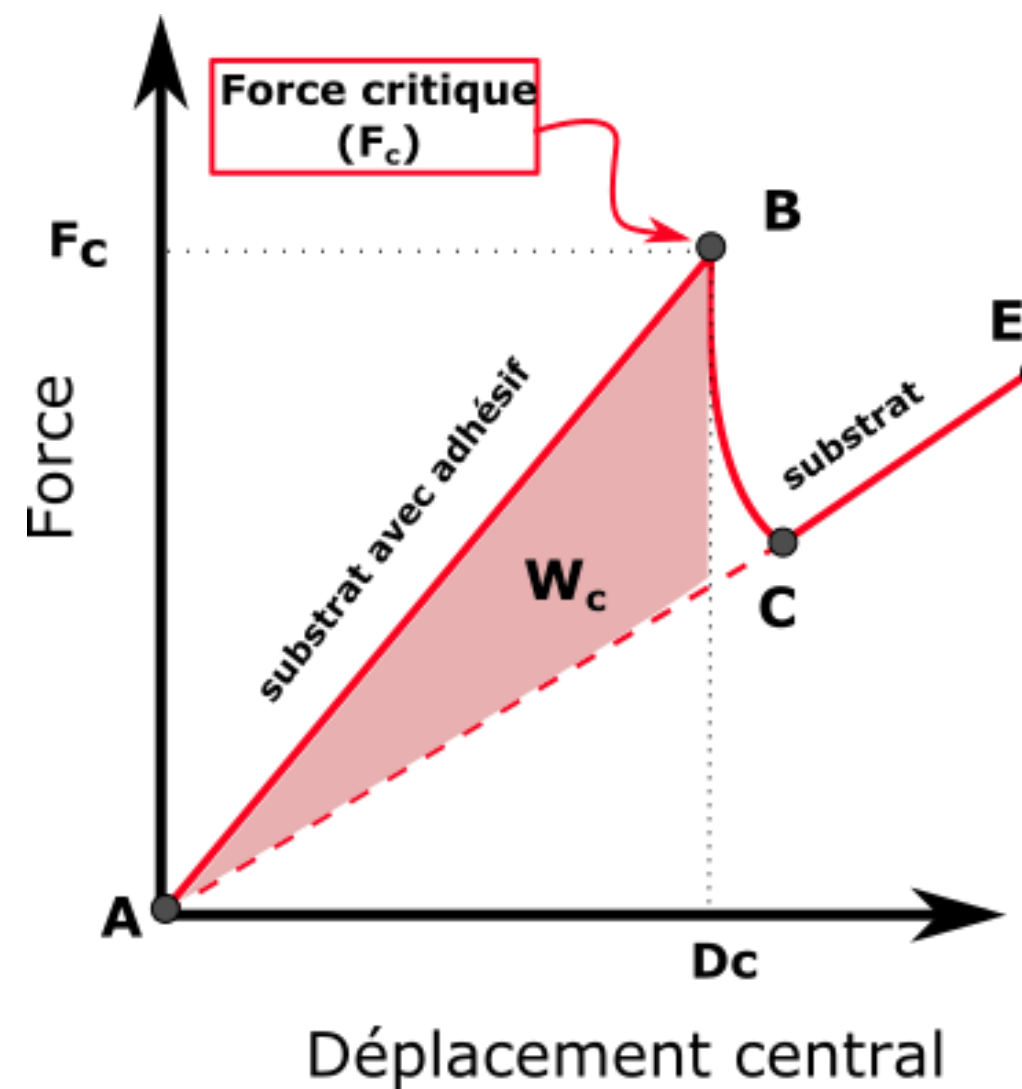
Endommagement de l’interface - **stable**



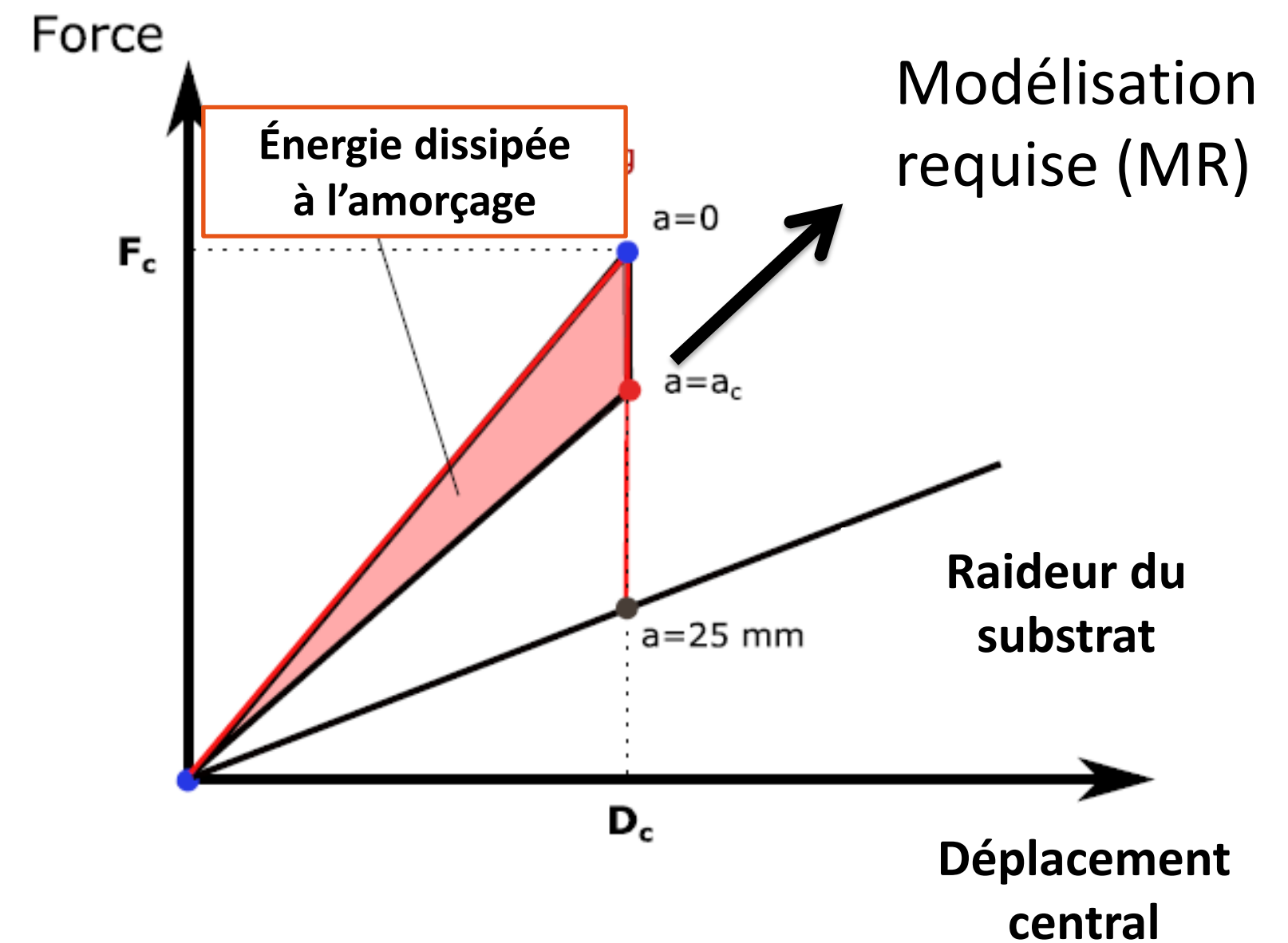
Hypothèses adoptées?

# Application des résultats – endommagement de l'interface

## Énergie globale



## Approche à suivre

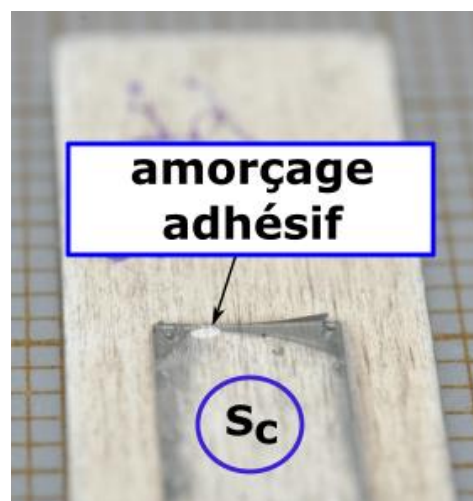
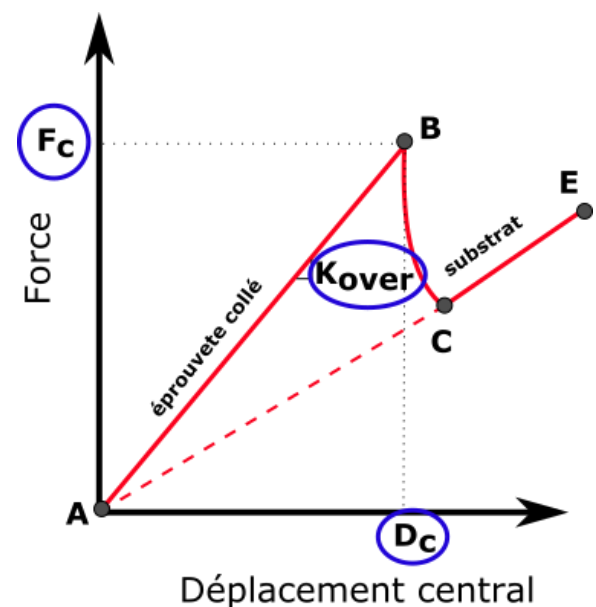


# Mécanique de la rupture (MR) pour caractérisation de l'amorçage adhésif

Utilisation d'une approche qui considère *la taille d'amorçage* et une *concentration de contrainte*

Approche via mécanique de la rupture

Données expérimentales



- **Phase-field model**
  - Fissure comme un champ continue variable
- **Endommagement de l'interface (CZM)**
  - *Approche non linéaire*
- Critère énergie-contrainte couplées (CC)
  - *Approche linéaire (plusieurs fois)*

Sauvage et al. (2017) – Énergie globale

Sauvage et al. (2019) – Contrainte

Les deux approches  
n'ont pas été couplées